

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra aplikované mechaniky

Komparační analýza pojiv určených pro uhlíkové kompozity s využitím metody akustické emise

Comparative Analysis of Epoxy Binders for Carbon Fiber Composites Using the Acoustic Emission Method

Student: Radka Mlýnková

Osobní číslo: MLY056

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Bc. Radka Mlýnková**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3901R003 Aplikovaná mechanika**
Téma: **Komparační analýza pojiv určených pro uhlíkové kompozity s využitím metody akustické emise**
Comparative Analysis of Epoxy Binders for Carbon Fiber Composites Using the Acoustic Emission Method

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte teoretický úvod do problematiky kompozitních materiálů a měření akustické emise.
2. Na dodaném souboru vzorků realizujte tahové zkoušky v jejichž průběhu bude na vzorcích monitorována aktivita akustické emise.
3. Na základě realizovaných zkoušek navrhnete zkušební metodiku, porovnejte a vyhodnoťte vlastnosti jednotlivých pojiv.

Seznam doporučené odborné literatury:


Ch. U. Grosse, M. Ohtsu, Acoustic Emission Testing, Springer Science & Business Media, 2008, ISBN: 3540699724
Z. Nazarchuk, V. Skalskyi, O. Serhiyenko, Acoustic Emission: Methodology and Application, Springer, 2017, ISBN: 3319493507
J. K. Burnett, Theory and Uses of Acoustic Emissions, Nova Science Publishers, 2011, ISBN: 1612099602
D.D.L. Chung, Carbon Fiber Composites, Butterworth-Heinemann, 1994, ISBN: 9780750691451

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry

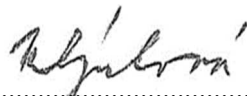



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

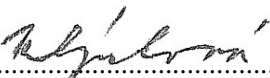


.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědoma, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі́, że Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі́, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020


.....
Podpis studenta

Anotace bakalářské práce

MLÝNKOVÁ, Radka. *Komparační analýza pojiv určených pro uhlíkové kompozity s využitím metody akustické emise*. Ostrava, 2020. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky. Vedoucí práce: doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.

Bakalářská práce se zabývá zkoušením kompozitních materiálů s matricí na bázi epoxidových pryskyřic a s výztuží z uhlíkových vláken. V první části práce jsou shrnuty vlastnosti epoxidových kompozitů. Další kapitola je věnována tahovým a ohybovým zkouškám nevyztužených pryskyřic, ze kterých jsou stanoveny moduly pružnosti v tahu a v ohybu. V poslední kapitole je popsán proces generování a šíření signálů akustické emise a jejich záznamu a způsob aplikace této metody při tahových a ohybových zkouškách kompozitů s uhlíkovými vlákny.

Annotation of bachelor thesis

MLÝNKOVÁ, Radka. *Comparative Analysis of Epoxy Binders for Carbon Fiber Composites Using the Acoustic Emission Method*. Ostrava, 2020. Bachelor Thesis. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics. Thesis head: doc. Ing. Michal Šofer, Ph.D.

The bachelor's thesis deals with the testing of composite materials with a matrix of epoxy resins and with carbon fibre reinforcement. The first part of the thesis summarizes the properties of epoxy composites. The next chapter deals with tensile and flexure tests of unreinforced resins, from which the modulus of elasticity in tension and flexure is determined. The last chapter describes the process of generating and propagating acoustic emission signals and their testing and the method of application of this method in tensile and flexure tests of carbon fibre composites.

Obsah

1	Úvod	7
2	Kompozitní materiály	7
2.1	Definice kompozitů	7
2.2	Rozdělení kompozitů	8
2.3	Kompozity s polymerní matricí	8
2.3.1	Polyesterové pryskyřice	8
2.3.2	Vinylesterové pryskyřice	9
2.3.3	Epoxidové pryskyřice	9
2.4	Uhlíková vlákna	10
2.4.1	Vlastnosti uhlíkových vláken	10
2.4.2	Výroba uhlíkového vlákna	10
3	Tahové a ohybové zkoušky bez měření akustické emise	11
3.1	Zkušební tělesa	11
3.2	Materiály zkušebních těles	11
3.3	Tahová zkouška	12
3.4	Ohybová zkouška	23
4	Tahové a ohybové zkoušky s měřením akustické emise	31
4.1	Zkušební tělesa	34
4.2	Měřicí přístroje	34
4.3	Tahová zkouška	35
4.4	Ohybová zkouška	41
5	Závěr	44
6	Citace	45
7	Bibliografie	45

1 Úvod

Práce se zabývá možností praktického využití metody snímání akustické emise při experimentálním stanovování a vyhodnocování mechanických vlastností kompozitních materiálů s matricí na bázi pryskyřic. Tato nedestruktivní měřicí metoda je hojně používaná téměř ve všech odvětvích strojírenství a průmyslu, protože umožňuje sledovat různé technologické procesy a změny stavu materiálů a umožňuje také detekovat aktivní závady během zatěžování materiálu.

V bakalářské práci jsou popsány obecné vlastnosti kompozitních materiálů na bázi pryskyřic a vlastnosti a výroba uhlíkových vláken. V další kapitole je popsán průběh tahových a ohybových zkoušek provedených na nevyztužených pryskyřičích bez snímání akustických emisí. Součástí kapitoly je i vyhodnocení a porovnání výsledků zkoušek. Čtvrtá kapitola je věnována tahovým a ohybovým zkouškám vzorků s výztuží z uhlíkových vláken. Při těchto zkouškách byl sledován rozvoj akustických emisí, ovšem bez vyhodnocování mechanických vlastností kompozitů.

2 Kompozitní materiály

Kompozitními nazýváme takové materiály, které jsou účelně vyrobeny z několika složek tak, aby byly co možná nejlépe využity kvality každé složky a aby byly potlačeny jejich méně příznivé vlastnosti. Na této myšlence je založen železobeton, kdy je nízká pevnost betonu v tahu vyváжена výbornou tahovou pevností oceli, nebo kompozitní profily průřezu I a U, kde je výztuha ze skelných či uhlíkových vláken chráněna proti vnějším vlivům pryskyřičnou matricí a společně vytvářejí alternativu k ocelovým nosníkům např. v chemicky agresivním prostředí.

Kromě stavebnictví nacházejí kompozity své místo i v mnohých dalších oborech, jako jsou letecký a automobilový průmysl, energetika, elektrotechnika, lékařství nebo sport.

2.1 Definice kompozitů

Kompozitní materiály jsou takové materiály, které se skládají ze dvou a více složek rozdílných mechanických, fyzikálních a/nebo chemických vlastností. Každá složka plní jinou funkci – tvrdší a pevnější složka, často nespojitá, se nazývá výztuha (výztuž) a vyznačuje se lepšími mechanickými vlastnostmi než druhá složka kompozitu, matrice. Ta naopak bývá poddajnější a spojitá, její hlavní funkcí je vytvoření vnějšího tvaru kompozitního výrobku, ochrana výztuže, zajištění polohy a orientace výztuže. Další nezbytnou složkou je tzv. mezifáze. Tvoří rozhraní mezi matricí a výztuží zajišťující přenos vnějšího napětí z matrice do výztuže.

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze různých rozměrů. Ve strojírenství mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých největší příčné rozměry výztuže se pohybují v rozmezí 100 až 102 μm . Makrokompozity jsou používány především ve stavebnictví (železobeton, polymerbetony obsahující drcené kamenivo a písek apod.). Nanokompozity obsahují částice, jejichž největší rozměr je v nm [1].

Aby vícefázový materiál mohl být zařazen mezi kompozitní materiály, musí splňovat následující podmínky:

- kompozit musí být připraven mechanickým mísením složek,
- podíl výztuže musí být větší než 5%,
- výztuž by měla být výrazně pevnější v tahu a tužší než matrice.

Hlavní nevýhodou kompozitních materiálů je jejich výroba, která klade důraz na přesné dodržení technologických postupů, na něž jsou kompozity citlivé. Daný poměr výztuže a matrice, orientace vláken a způsob vytvrzování mají velký vliv na žádoucí vlastnosti budoucího materiálu. Výroba je ovlivněna hlavně účinky vnějšího prostředí.

2.2 Rozdělení kompozitů

Kompozity můžeme rozdělit podle různých hledisek, v praxi kompozity nejčastěji rozdělujeme podle druhu matrice a podle tvaru výztuže.

Podle použité matrice rozeznáváme:

- kompozity s polymerní matricí - PMCs (Plastic Matrix Composites),
- kompozity s kovovou matricí - MMCs (Metal Matrix Composites),
- kompozity s keramickou matricí - CMCs (Ceramic Matrix Composites),
- speciální kompozity, např. se skleněnou matricí.

Podle tvaru výztuže kompozity (zde pouze mikrokompozity) dělíme na:

- vláknové kompozity
 - a) s kontinuálními vlákny,
 - b) s krátkými vlákny,
- částicové kompozity
 - a) sférické částice (izometrické),
 - b) destičkovité částice (anizometrické).

Předmětem této bakalářské práce jsou zkoušky **vláknových** kompozitů s **polymerní** matricí.

2.3 Kompozity s polymerní matricí

Firma Havel Composites, která pro potřeby tahových a ohybových zkoušek poskytl zkušební vzorky, dodává kompozitní materiály s polymerní matricí. Ve své stálé nabídce vedou kompozity s polyesterovou, vinylesterovou a epoxidovou pryskyřicí.

2.3.1 Polyesterové pryskyřice

Polyesterové pryskyřice jsou nejpoužívanějšími pryskyřičními systémy, zvláště v loďařském průmyslu. Nemodifikované nenasycené polyesterové pryskyřice se při vytvrzování značně smršťují (o 7 až 8 %). Jsou křehké a snadno v nich vznikají mikrotrhlínky. Dobře odolávají ultrafialovému záření. Polyesterové pryskyřice dobře smáčejí skelná vlákna, ale pevnost vazby matrice - skelné

vlákno je menší. Pro zpracování je nutné, aby pryskyřice obsahovala ještě další látky jako katalyzátor, akcelerátor, přídavné látky (tixotropní aditiva, pigmenty, plnivo, látky vzdorující ohni nebo chemikáliím). Plniva jsou přidávána v množstvích do 50 % hmotnosti pryskyřice, některá aditiva však mohou ovlivnit ohybové a tahové pevnosti laminátu [2].

Základní druhy nenasyčených polyesterových pryskyřic jsou:

- orthoftalová – z polyesterových pryskyřic má nejnižší cenu. Velmi dobře smáčí sklovláknité výztuže. Výrobky mají velmi dobré mechanické parametry, vysokou teplotní odolnost a vysokou pevnost.
- izoftalová - dražší a kvalitnější než orthoftalová, lépe odolává chemickým a tepelným vlivům. Výrobky jsou korozivzdorné při styku s anorganickými i organickými kyselinami.
- fumarová - dobrá odolnost vůči chemickým vlivům, vysoká tvarová stálost za tepla
- chlorftalová - je nehořlavá, mechanické vlastnosti jsou horší
- tereftalová – vykazuje velmi dobrou chemickou i tepelnou odolnost, velmi dobré pevnostní a výrobní parametry. Má nízkou viskozitu.

2.3.2 Vinylesterové pryskyřice

Molekulová struktura vinylesterových pryskyřic se podobá polyesterovým, ale primárně se liší v pozici jejich reaktivních míst, která jsou umístěna pouze na koncích molekulových řetězců. Odolnost celého řetězce vůči nárazovému zatížení činí vinylestery tužší a houževnatější ve srovnání s polyesterem [2]. Vinylesterové pryskyřice nabízejí lepší odolnost proti vodě a chemikáliím než pryskyřice polyesterové, vykazují lepší odolnost proti korozi a vyšší tepelnou odolnost. Nevýhodou je vyšší cena a pomalejší vytvrzování.

Pro svou odolnost vůči chemickým vlivům se používají například pro výrobu potrubí a chemických skladovacích tanků.

2.3.3 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice se pro své vynikající mechanické vlastnosti a odolnosti vůči vnější degradaci uplatňují při stavbě letadlových součástí, dále jako primární konstrukční materiál na lodě nebo jako sekundární aplikace pro pláště trupů nebo náhrada vodou degradované polyesterové pryskyřice. Kromě toho se epoxidy používají jako lepidla, těsnící směsi, licí směsi, těsniva, laky a barvy, ale také laminární pryskyřice pro širokou paletu aplikací.

Mimo zmíněné odolnosti vůči vnějším vlivům a mechanické odolnosti se epoxidy vyznačují také vysokou adhezní pevností, odolností proti únavě, chemickou odolností a malým smršťováním během vytvrzování, což minimalizuje jak „prokopírování“ výztužné tkaniny, tak vnitřní napětí. Epoxidy odolávají teplotám až 140 °C v mokřem a 220 °C v suchém prostředí [2].

Jejich výhodou je i možnost delšího zpracování. V závislosti na zvoleném urychlovači tuhnutí jsou epoxidové pryskyřice snadno a rychle vytvrditelné při jakékoliv teplotě v rozsahu od 5 °C do 150 °C (čím vyšší teplota, tím rychlejší vytvrzení a lepší mechanické vlastnosti materiálu).

Nevýhodami epoxidových pryskyřic jsou vyšší cena v porovnání s polyesterovými a vinylesterovými pryskyřicemi, žíravost a kritické poměry míchání.

2.4 Uhlíková vlákna

Uhlíkové vlákno (nebo také karbonové vlákno – z anglického carbon fibre) je druh vlákna složeného převážně z uhlíku v jeho různých modifikacích. Průměr těchto vláken je 5–8 μm . Využívá se především pro výrobu pevných a odolných tkanin používaných ve strojírenství, stavebnictví, sportovním průmyslu apod..

2.4.1 Vlastnosti uhlíkových vláken

Uhlíková vlákna mají vysokou pevnost (pevnost v tahu je až 60krát větší než u oceli), vysoký modul pružnosti, dobrou tepelnou odolnost a nízkou měrnou hmotnost. Uhlíková vlákna se vyrábějí pyrolýzou viskóзовých nebo polyakrylonitrilových (PAN) vláken a alternativně i z tzv. anizotropní smoly (zbytky po destilaci černého uhlí a ropy), zvláknované v tavenině. Pro výrobu nejtužších uhlíkových vláken se používají právě smoly. Nejtužší komerčně vyráběná vlákna z mezifázových smol (smoly s kapalnými krystaly) dnes dosahují modulu pružnosti v tahu E až 965 GPa. Dnes se vyrábějí také nejnověji z vláken novoloidu – vláken fenol-aldehydových. [3]

Nejčastěji se můžeme setkat s těmito typy uhlíkových vláken [4]:

- Karbonizovaná vlákna - mají střední modul pružnosti a dobrou pevnost v tahu. Lze je považovat za standardní uhlíková vlákna (HS – “High Strength”, AS – “Average Strength”, HT nebo HTA – “High Tenacity”)
- Vysokomodulová grafitizovaná vlákna (HM – “High Modulus”)
- Vlákna vysoce pevná - se středním modulem pružnosti (IM – “Intermediate Modulus”)
- Vlákna s vysokým modulem pružnosti - (VHM - “Very High Modulus”, UHM- “Ultra High Modulus”)

2.4.2 Výroba uhlíkového vlákna

Výroba uhlíkových vláken má obvykle pět fází [5]:

- a) **Příprava prekurzoru** – úprava výchozího materiálu buď tavným zvláknováním, nebo zvláknováním z roztoku. Struktura prekurzoru ovlivní strukturu a pevnost uhlíkových vláken. Uhlíkové vlákno je pak dlouženo na požadovanou jemnost.
- b) **Stabilizace** – před karbonizací je třeba, aby z dlouhých uhlíkových vláken vznikla teplotně stabilní zesíťená struktura. Provádí se na vzduchu zahřátím na poměrně nízké teploty 200 - 450 °C na 20 – 30 minut. To způsobí, že uhlíkové vlákno sbírá kyslíkové molekuly ze vzduchu a dojde tak k přerovnání atomové struktury vlákna. Při stabilizaci vzniká ve vlákne také vlastní teplo, které musí být kontrolováno, aby se zabránilo přehřívání. V praxi se někdy používá tažení vlákna skrze řadu zahříváných komor nebo karbonové vlákno prochází přes rozehráté válce a sypké materiály, které odebírají přebytečné teplo.

- c) **Karbonizace** – jedná se o převod prekurzoru na **uhlíková vlákna**. Provádí se v inertní atmosféře (obvyčejně dusíkové), při teplotách mezi 1000 °C – 2000 °C. Bez přístupu kyslíku karbonové vlákno nemůže hořet. Místo toho způsobí vysoká teplota rozkmitání atomů ve vlákne tak, že většina neuhlíkových atomů je odstraněna. Výsledné vlákno obsahuje 85 - 95% uhlíku.
- d) **Grafitizace** – tato fáze není nutná, ale při jejím provedení vznikají tzv. grafitová vlákna. Provádí se v inertní atmosféře, při teplotách mezi 2400 °C – 3000 °C. Dochází ke zvýšení obsahu uhlíku na cca 99 % a více. Vzniká také uspořádaná vrstevnatá struktura.
- e) **Povrchová úprava** – povrch karbonového vlákna dobře neváže epoxidy a další látky používané v kompozitních materiálech. Proto se povrch vlákna mírně oxiduje. Přidání kyslíkových atomů na povrch umožňuje lepší přilnavost dalších látek a zhrubnutí povrchu pro lepší mechanické spojení s těmito látkami. Okysličením může být dosaženo přístupem plynů, jako je vzduch, oxid uhličitý, nebo ozon nebo ponořením do různých kapalin jako chlornanu sodného nebo kyseliny dusičné. Uhlíkové vlákno může být také pokryto ochrannou vrstvou proti poškození při dalším zpracování.

3 Tahové a ohybové zkoušky bez měření akustické emise

Samotná metoda měření akustické emise neposkytuje data pro vyhodnocení pevnostních vlastností materiálu, proto byly nejprve provedeny tahové a ohybové zkoušky nevyztužených pryskyřic, na jejichž základě byly vypočteny moduly pružnosti pryskyřic v tahu a ohybu.

3.1 Zkušební tělesa

Pro tahové a ohybové zkoušky bez použití AE bylo vyrobeno šest tabulí z různých druhů nevyztužených pryskyřic kombinovaných s tužidly. Průměrná tloušťka těchto tabulí byla 5 mm. Z každé tabule byly CNC frézku vyřezány vždy dvě série zkušebních těles, jedna pro tahovou a druhá pro ohybovou zkoušku.

3.2 Materiály zkušebních těles

Všechna tělesa byla vyrobena z epoxidových pryskyřic vytvrzených tužidly, do některých vzorků byly dodány další příměsi (pigmenty, plniva).

Nevyztužené desky byly vyrobeny z celkem pěti různých kombinací pryskyřic a tužidel:

- materiál č. 1: pryskyřice LH 385 + tužidlo H 512,
- materiál č. 2: pryskyřice LH 385 + tužidlo H 146,
- materiál č. 3: pryskyřice LH 288 + tužidlo H 146,
- materiál č. 4: pryskyřice LH 385 + tužidlo H 287,

- materiál č. 5: pryskyřice LH 289 + tužidlo H 146. Z tohoto materiálu byly vyrobeny dvě tabule v různých barvách (modrá a zelená).

V tabulce 1 jsou uvedeny vlastnosti použitých pryskyřic [2]:

Tabulka 1 - Vlastnosti použitých pryskyřic

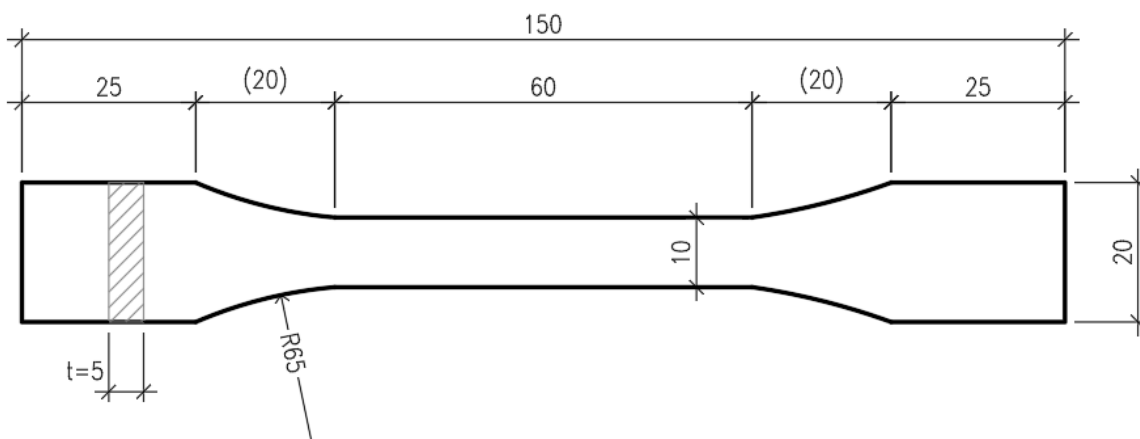
Pryskyřice	Popis
LH 288	Speciální epoxidová pryskyřice s extrémně nízkou viskozitou. Je vhodná pro infuzní technologie. Produkty se vyznačují vysokou tvrdostí.
LH 289	Epoxidová pryskyřice vytvářející hladký a lesklý povrch. K použití jako vrchní lak nebo glazura na umělý kámen.
LH 385	Epoxidová pryskyřice certifikovaná pro letecký průmysl a pro výrobu modelů. Pryskyřice s tužidlem vytváří velmi viskózní směs a díky tomu jsou vlákna rychle a kvalitně prosycena. Díky tomu má výrobek podstatně nižší hmotnost a vyšší užitkovou hodnotu.

Zvolené tužidlo ovlivňuje dobu zpracovatelnosti pryskyřice, teplotu, při které dojde k vytvrzení pryskyřice a dobu nutnou pro vytvrzení.

3.3 Tahová zkouška

Podstatou tahové zkoušky je pozvolné zatěžování vzorku tahovou silou v podélné ose vzorku až do doby, kdy dojde buďto k porušení (přetržení) vzorku, nebo k předem dohodnuté deformaci (prodloužení) vzorku. Během zkoušky jsou zaznamenávány tahová síla a absolutní hodnota prodloužení, ze kterých je následně vypočten modul pružnosti v tahu.

Tahové zkoušky byly realizovány na zkušebních tělesech tvaru oboustranných lopatek. Pro každý materiál bylo vyrobeno šest kusů těchto těles.



Obrázek 1 - Zvolené rozměry tělesa pro tahovou zkoušku

Před samotnou zkouškou byly mikrometrem změřeny tloušťka a šířka dříku každého tělesa. Každý vzorek byl do zkušebního zařízení (zkušební trhací stroj Testometric M500-50CT) upnut tak, aby počáteční vzdálenost mezi čelistmi byla 150 mm. Vzdálenost mezi extenzometry byla 50 mm. Poté byl vzorek zatěžován tahovou silou při rychlosti zatěžování 2 mm/min až do porušení.

Během zkoušky byly zaznamenávány tahová síla a absolutní prodloužení vzorku. Tyto údaje byly vloženy do tabulkového procesoru (Microsoft Excel), kde na jejich základě byly dopočítány relativní prodloužení, teoretické tahové napětí a konečně modul pružnosti v tahu.

Poměrné prodloužení je v normě ČSN EN ISO 527-1 definováno jako poměr počáteční upínací vzdálenosti mezi čelistmi a zvětšením upínací vzdálenosti mezi čelistmi od začátku zkoušky.

$$\varepsilon_t = \frac{L_0}{L} \quad [-] \quad (3.1)$$

kde je

L_0 počáteční vzdálenost čelistí [mm],

L absolutní vzdálenost čelistí [mm].

Teoretické napětí v tahu je dáno poměrem tahové síly ku počáteční průřezové ploše zkušebního tělesa:

$$\sigma_{teor} = \frac{F}{A} \quad [MPa] \quad (3.2)$$

kde je

F naměřená tahová síla [N],

A počáteční průřez dříku zkušebního tělesa [mm²].

V případě zkušebního zařízení vybaveného počítačem zmíněná norma dovoluje stanovení modulu pružnosti v tahu lineární regresní analýzou uplatněnou na část křivky nacházející se mezi body $\varepsilon_1 = 0,0005$ a $\varepsilon_2 = 0,0025$:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [MPa] \quad (3.3)$$

kde

$\frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ vyjadřuje směrnici regresní přímky, která podle metody nejmenších čtverců odpovídá části křivky napětí/poměrné prodloužení v intervalu poměrného prodloužení $0,0005 < \varepsilon < 0,0025$, vyjádřená v megapascálech.

Pro poměrná napětí z intervalu (ε_1 ; ε_2) a jim odpovídající σ_{teor} byla nalezena lineární regrese vyjádřená rovnicí

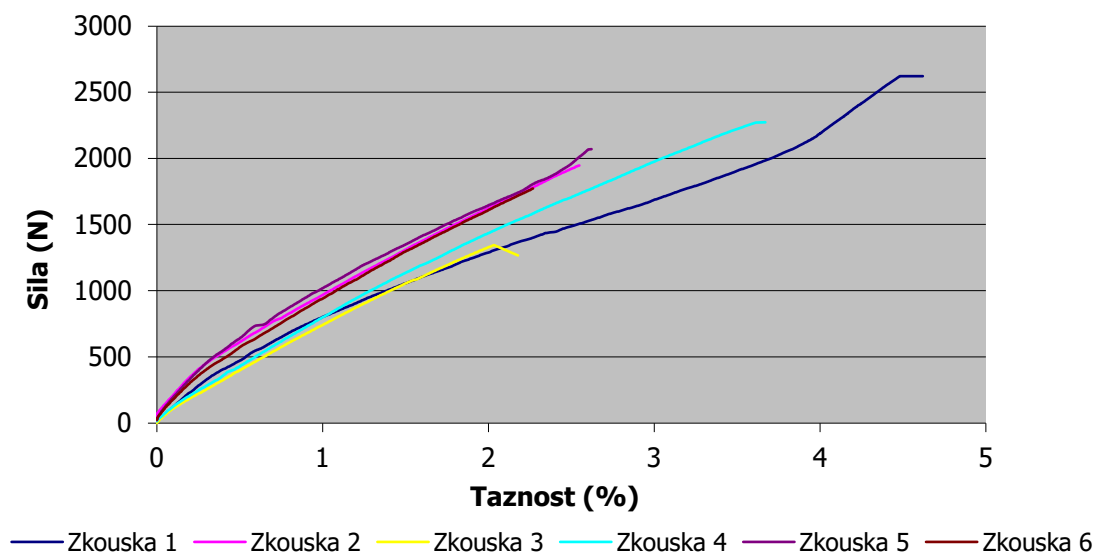
$$y = a \cdot x + b \quad (3.4)$$

kde $b = 0$, protože závislost napětí na poměrném prodloužení má tvar lineární rovnice bez absolutního členu.

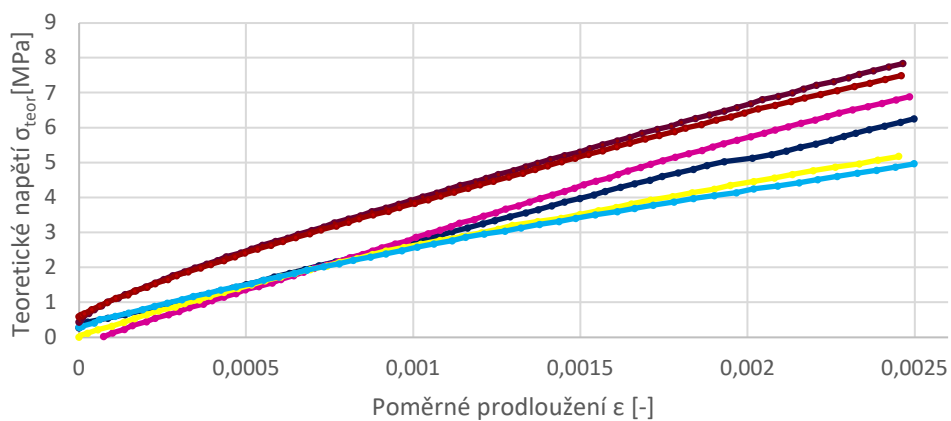
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.5)$$

Z výše uvedeného je zřejmé, že člen a v rovnici (3.4) odpovídá hledanému modulu pružnosti v tahu. Na dalších stránkách je pro každý materiál zobrazena série tří grafů. První graf je výstupem ze softwaru trhacího zkušebního stroje a zaznamenává rozvoj tahové síly od počátečního klidového stavu do přetržení vzorku. Druhý graf vyjadřuje závislost mezi vypočteným teoretickým napětím σ_{teor} a poměrným prodloužením vzorku na intervalu (0; 0,0025). Z těchto grafů je zřejmé, že některé zkoušky byly už na počátku zatíženy tahovou silou, takže křivka $\sigma_{\text{teor}}-\varepsilon$ nenarůstá od počátku souřadného systému, ale je vůči němu na svislé ose posunutá o $\sigma_{\text{teor},0}$. Tyto případy by vedly ke zkreslení výsledné hodnoty modulu pružnosti (zvyšovaly by ji), proto pro ně byl součinitel b z rovnice (3.4) uvažován nenulový, o hodnotě - $\sigma_{\text{teor},0}$.

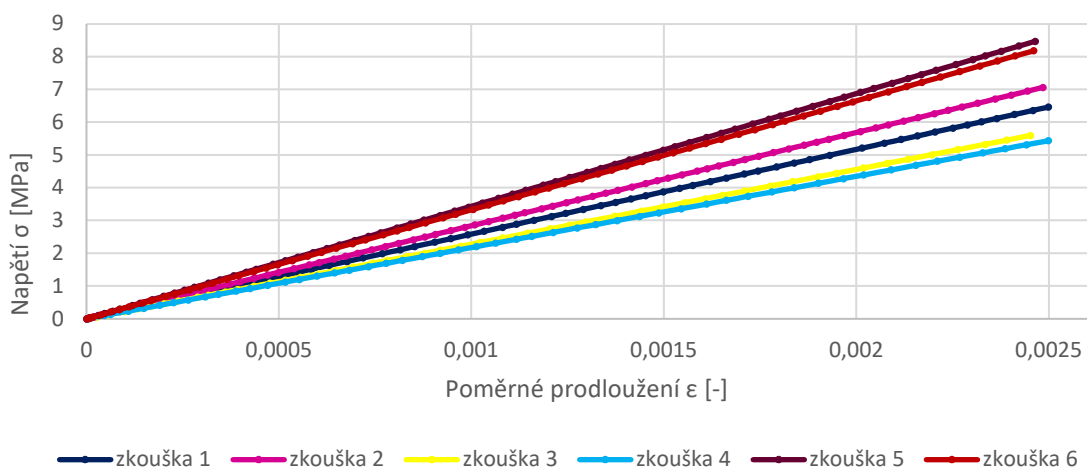
Na třetím grafu je tahové napětí na intervalu (0;0,0025) vykresleno lineárně závislé na poměrném prodloužení podle rovnice (3.5).



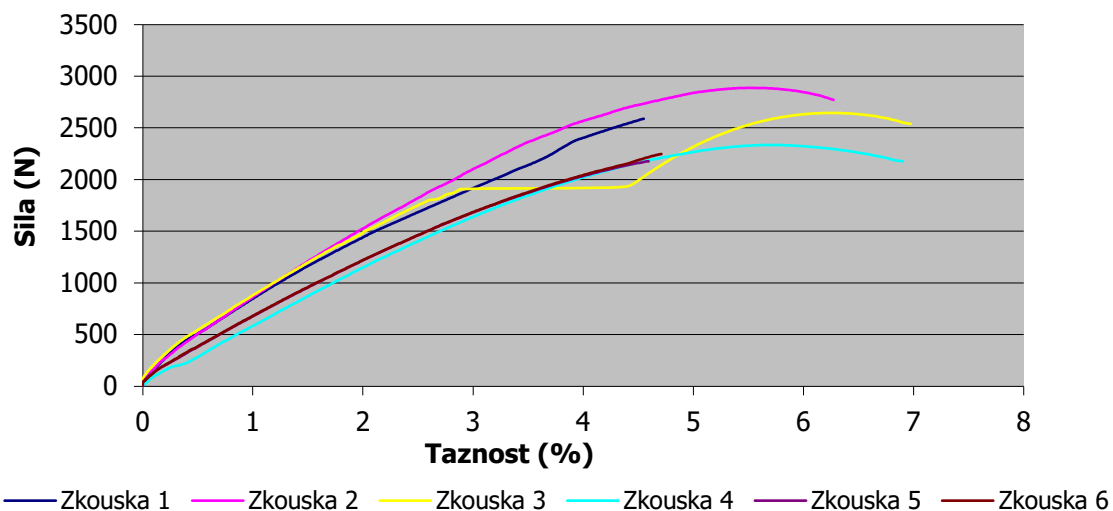
Obrázek 2 - Graf síla / taznost pro materiál LH 385 + H 512



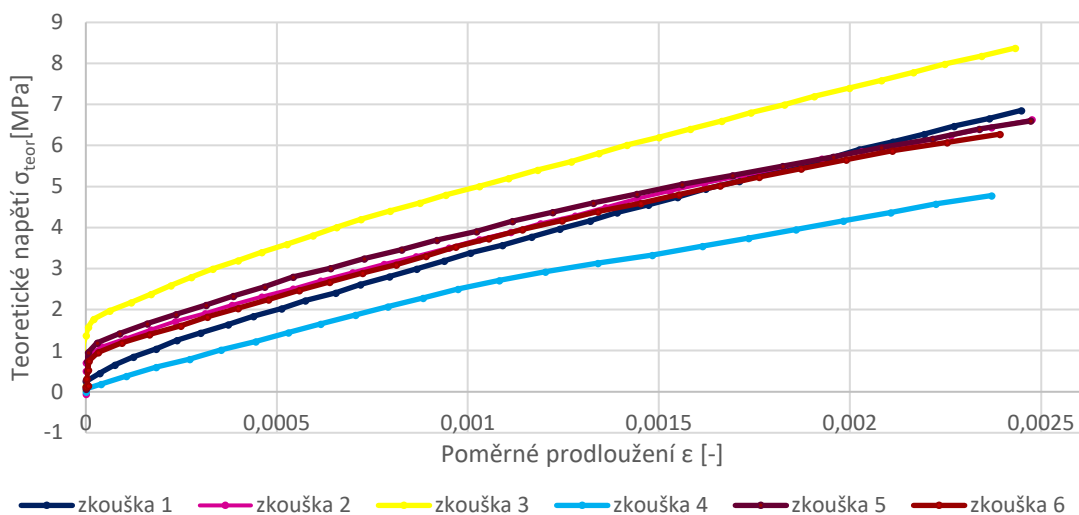
Obrázek 3 – Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 512



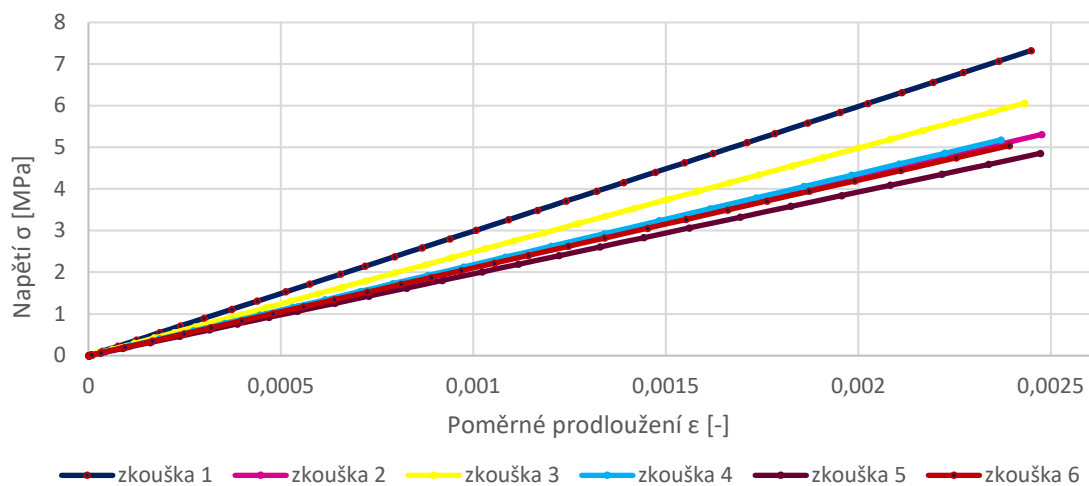
Obrázek 4 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 512



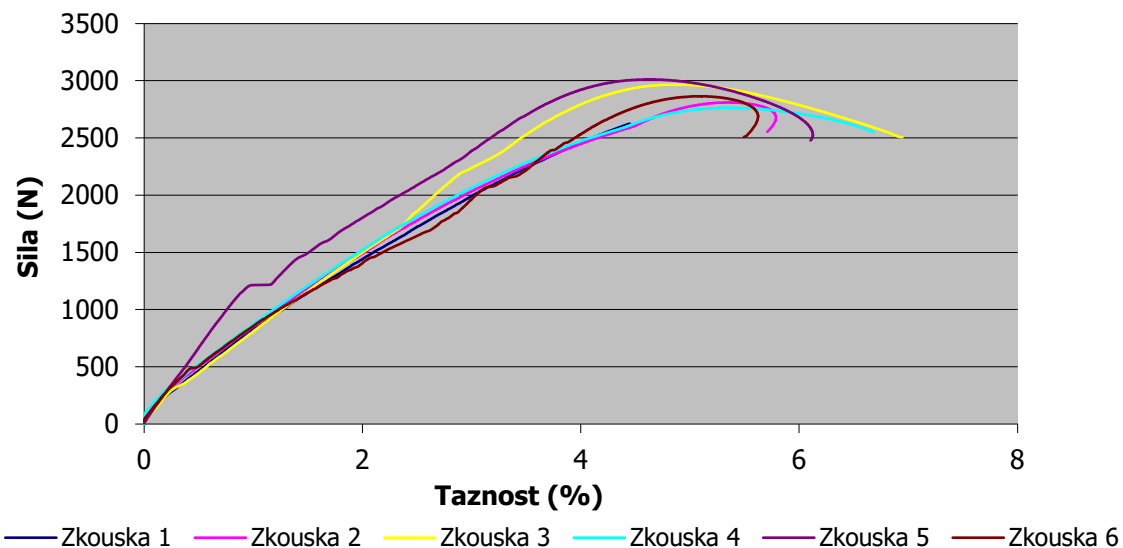
Obrázek 5 – Graf síla / taznost pro materiál LH 288 + H 146



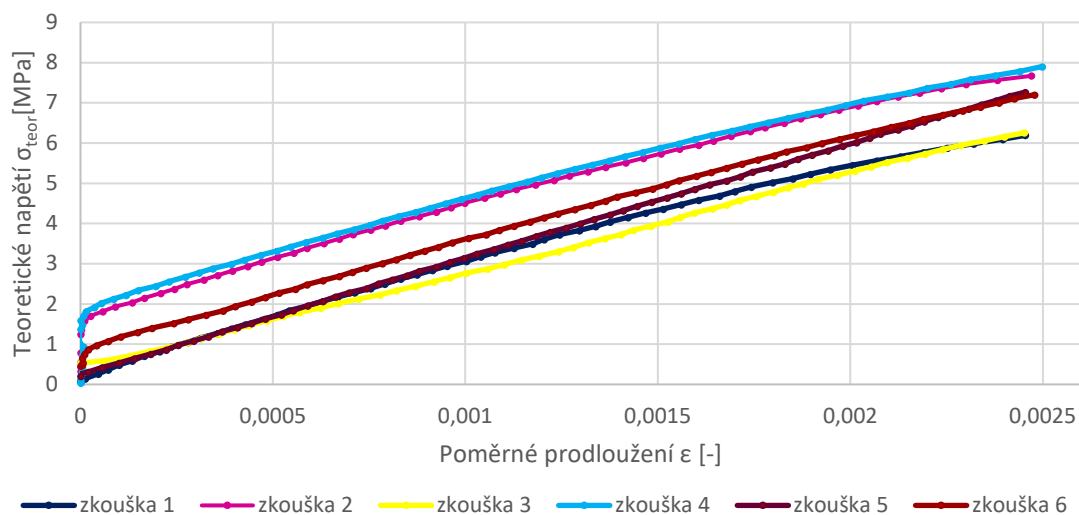
Obrázek 6 - Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 288 + H 146



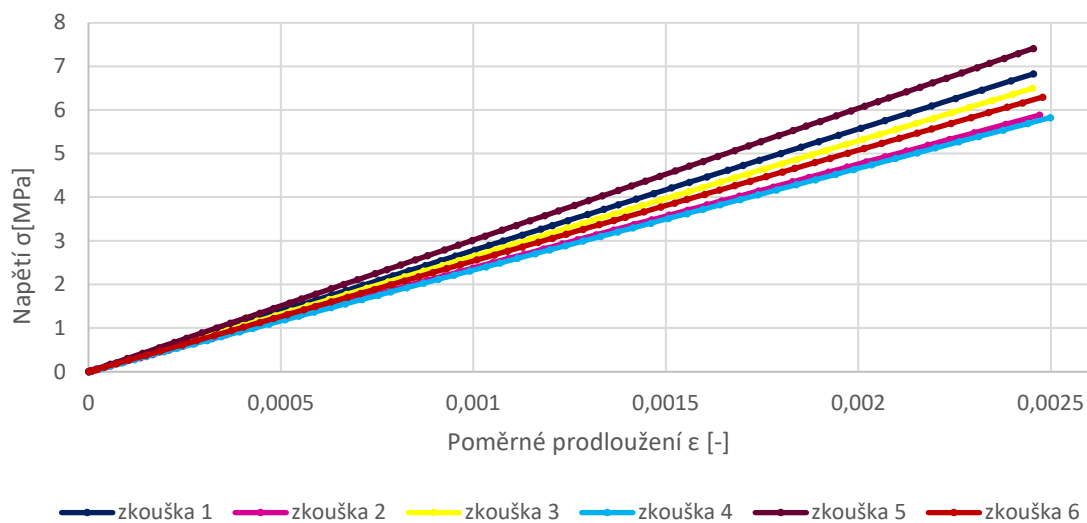
Obrázek 7 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 288 + H146



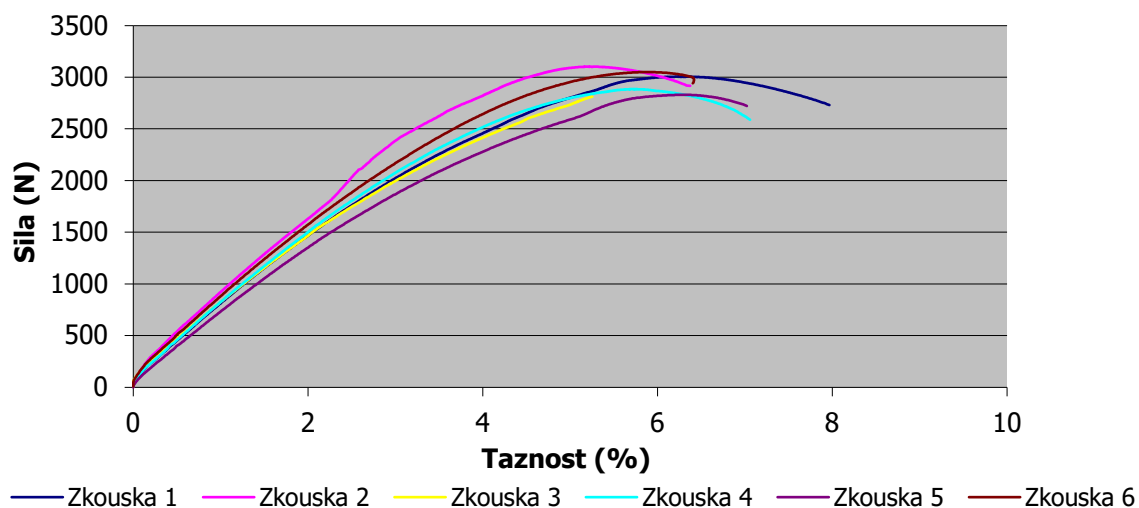
Obrázek 8 - Graf síla / taznost pro materiál LH 289 + H 146 (modrá)



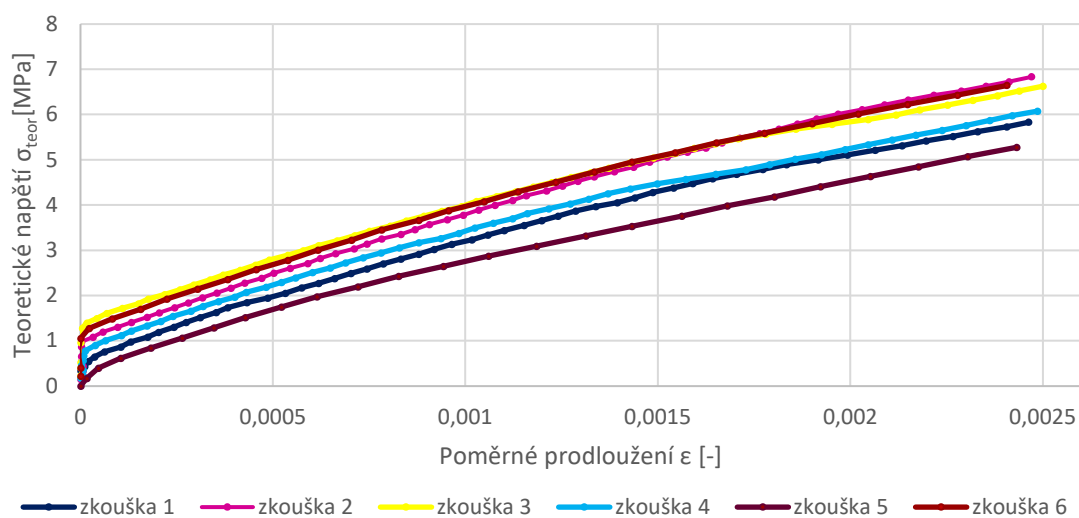
Obrázek 9 - Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 289 + H 146 (modrá)



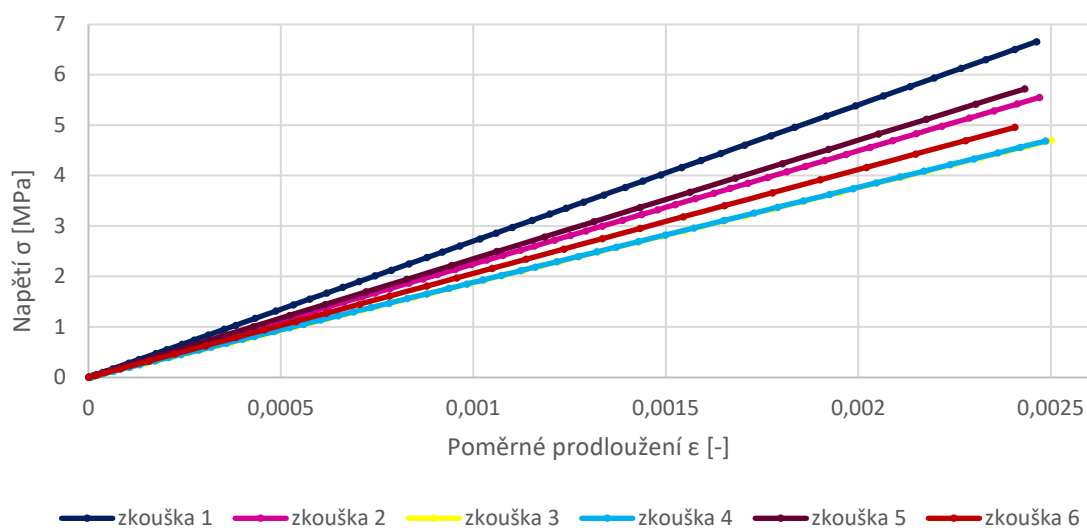
Obrázek 10 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 289 + H146 (modrá)



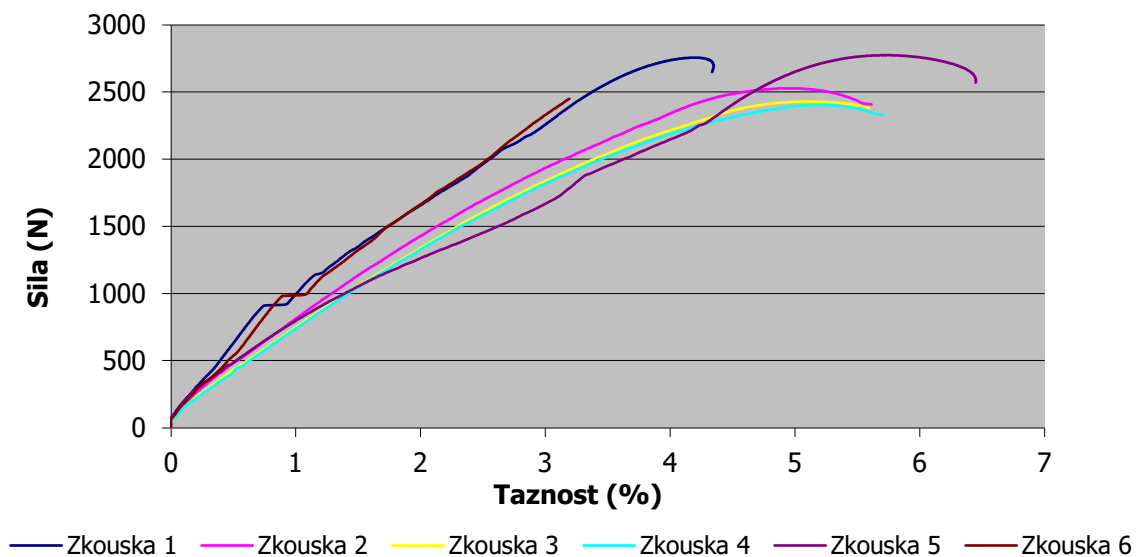
Obrázek 11- Graf síla / taznost pro materiál LH 289 + H 146 (zelená)



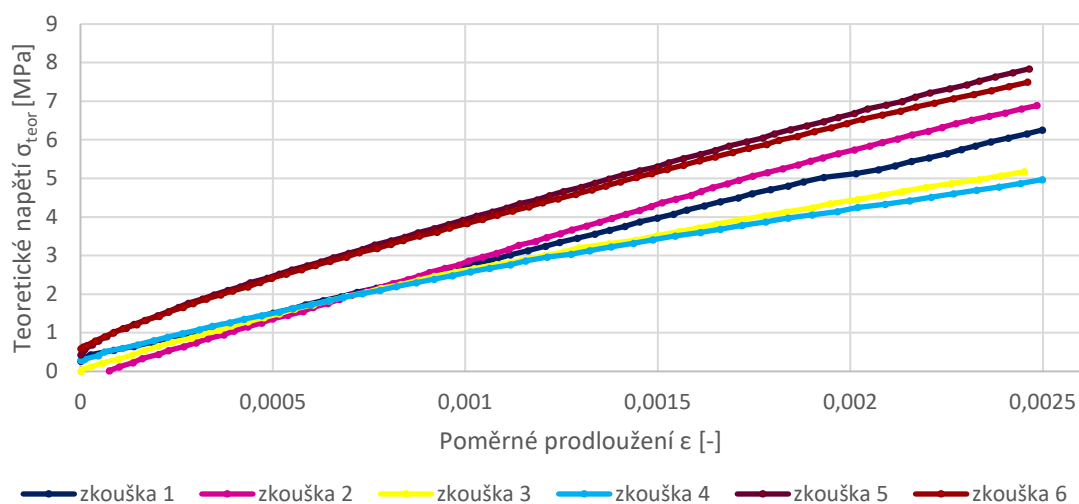
Obrázek 12 - Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 289 + H 146 (zelená)



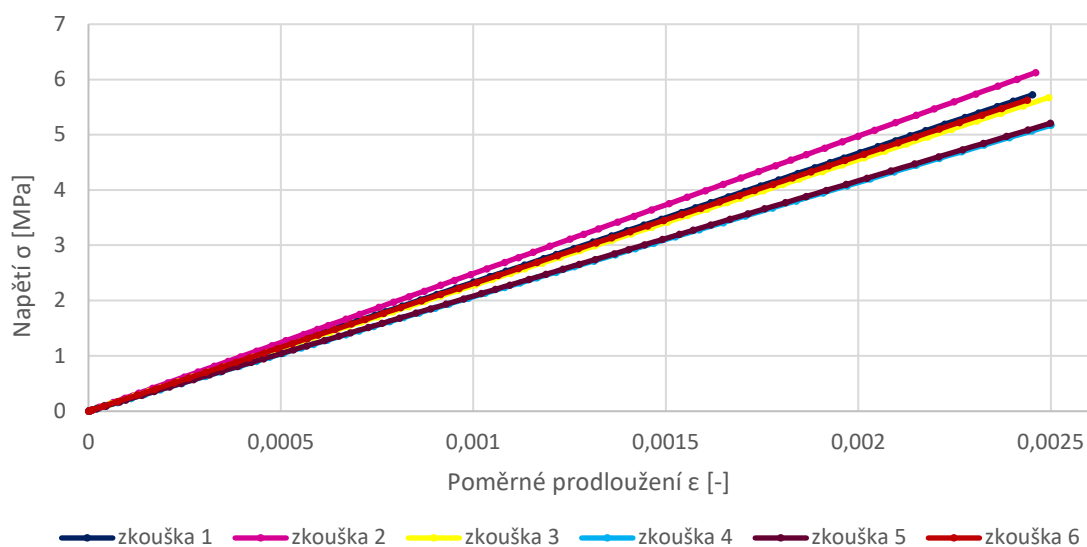
Obrázek 13 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 289 + H146 (zelená)



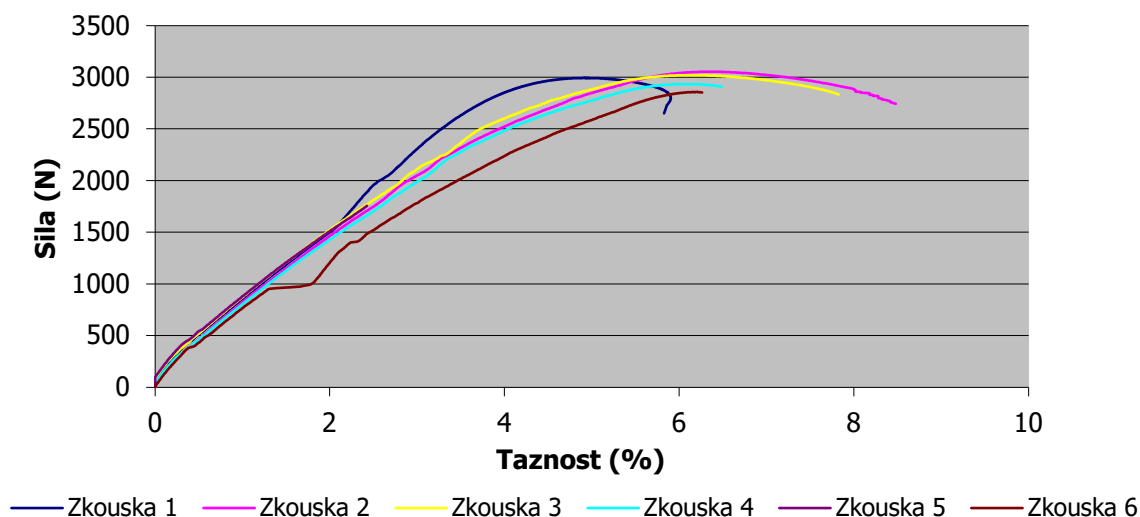
Obrázek 14 - Graf síla / tažnost pro materiál LH 385 + H 146



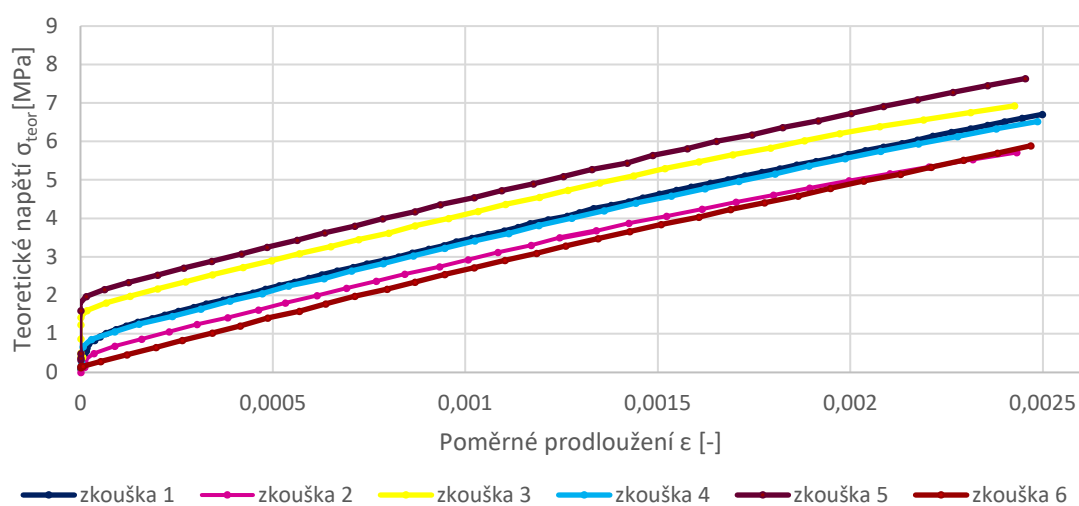
Obrázek 15 - Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 146



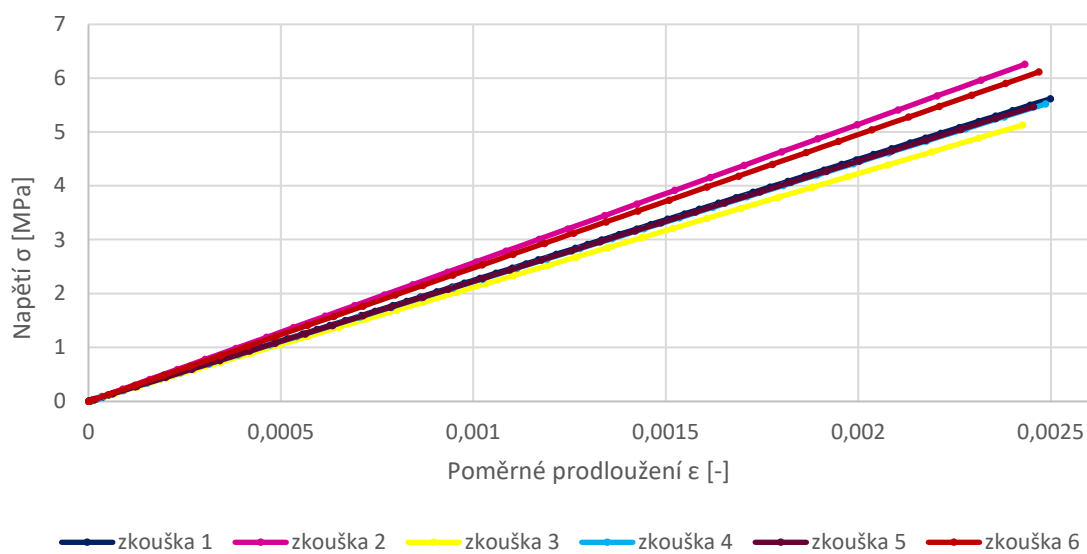
Obrázek 16 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 146



Obrázek 17 - Graf síla / tažnost pro materiál LH 385 + H 287



Obrázek 18 - Graf teoretické napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 287



Obrázek 19 - Graf napětí / prodloužení pro materiál LH 385 + H 287

V tabulce 2 jsou zkoušené materiály seřazeny sestupně podle vypočítaného modulu pružnosti.

Tabulka 2 - Výpočtem stanovený modul pružnosti v tahu

	Materiál	Modul pružnosti [MPa]
1.	LH 385 + H 512	2774,462
2.	LH 289 + H 146 (modrá)	2617,276
3.	LH 288 + H 146	2314,732
4.	LH 385 + H 287	2310,389
5.	LH 385 + H 146	2260,473
6.	LH 289 + H 146 (zelená)	2187,594

Na fotografiích níže je na detailu lomu vzorků vidět, jak se mění charakter lomu v závislosti na druhu pryskyřice a na přídatných látkách. Ze vzorků z pryskyřice LH 289 se odštípával materiál ve formě drobných třísek nebo šupin, vzorky se často lámaly na tři až čtyři části. Na pryskyřici LH 288 k úbytku materiálu prakticky nedocházelo, ale vzorky se také rozpadaly na několik částí. Z pryskyřice LH 385 v kombinaci s tužidly H 146 a H 287 se v lomu odštěpovaly drobné třísky, ale v mnohem menší míře než tomu bylo u pryskyřice LH 289, oproti tomu pryskyřice LH 385 s tužidlem H 512 vykazovala téměř hladký lom.



Obrázek 20 - Materiál LH 289 + H146. V místech přetržení často docházelo k odlamování materiálu formou třísek. Vzorky se často lámaly mimo oblast dřívku.



Obrázek 21 - Materiál LH 289 + H146. Materiál se ve zlomech odlamoval v šupinách. Vzorky z tohoto materiálu se často lámaly na více kusů.



Obrázek 22 - Materiál LH288 + H146. Ve zlomech nedocházelo k odštípnutí materiálu, ale vzorky se lámaly na více kusů.



Obrázek 23 - Materiál LH 385 + H 146. Ve zlomech se odštěpovaly drobné třísky.



Obrázek 24 - Materiál LH 385 + H 512. Lomy jsou téměř hladké.

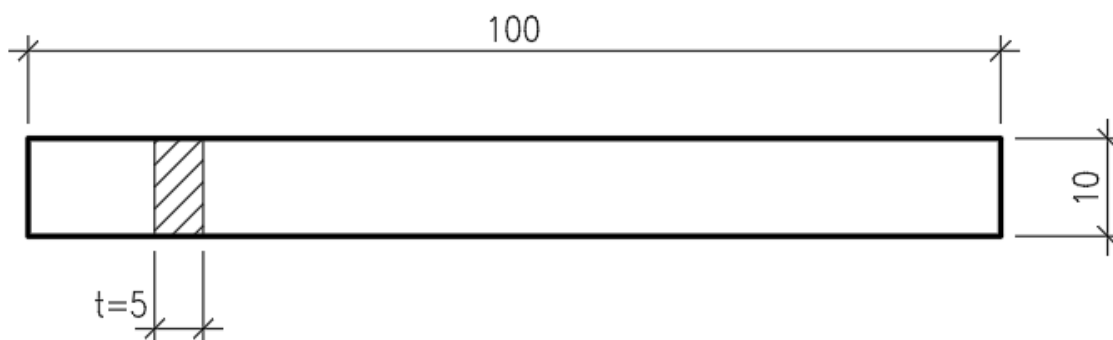


Obrázek 25 - Materiál LH 385 + H 287. Ve zlomech se odštěpovaly drobné třísky.

3.4 Ohybová zkouška

Ohybové zkoušky nevyztužených pryskyřic byly provedeny v souladu s normou ČSN EN ISO 178: Plasty - Stanovení ohybových vlastností. Stejně jako soubor norem pro tahové zkoušky plastů i tato norma uvádí doporučené rozměry zkušebních těles, způsob výroby těles, řadu doporučených zkušebních rychlostí a metodiku výpočtu. Podstatou této zkoušky je zatěžování tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přítláčeným trnem uprostřed jejich rozpětí (tříbodový ohyb) [7].

Zkušební tělesa – kvádříky s rozměry dle obrázku 26 - byla vyrobena stejným způsobem jako tělesa pro tahovou zkoušku, tj. vyřezáním CNC frézou z nevyztužených pryskyřicových tabulí.



Obrázek 26 – Zvolené rozměry zkušebního tělesa pro ohybovou zkoušku

Před vlastním provedením zkoušky byly změřeny tloušťka a šířka každého kvádříku. Každý vzorek byl do zkušebního zařízení (Testometric M500-50CT) upnut tak, aby vzdálenost mezi podporami byla 70 mm. Poté byl vzorek zatěžován tahovou silou při rychlosti zatěžování 4 mm/min až do porušení.

Během zkoušky byly zaznamenávány síla působící na střed tělesa a průhyb tělesa. Stejně jako u tahové zkoušky byly tyto údaje vloženy do tabulkového procesoru (Microsoft Excel), kde na jejich základě byly dopočítány deformace ohybem, napětí v ohybu a nakonec modul pružnosti v ohybu.

Napětí v ohybu je dáno vztahem

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} [MPa] \quad (3.6)$$

kde je

- F použitá síla [N],
- L rozpětí podpor [mm],
- b šířka vzorku [mm],
- h tloušťka vzorku [mm].

Deformace ohybem je v normě [7] definována vztahem

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} [-] \quad (3.7)$$

kde je

s naměřený průhyb [mm],

h počáteční tloušťka tělesa [mm],

L vzdálenost mezi podporami [mm].

Pro výpočet modulu pružnosti v ohybu bylo třeba dopočítat průhyby s_1 a s_2 při deformacích $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$.

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} \cdot L^2}{6h} [mm] \quad (3.8)$$

Samotný modul pružnosti se vypočítá ze vzorce

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} [MPa] \quad (3.9)$$

kde je

σ_{fi} napětí v ohybu měřené při průhybu s_i [MPa].

V případě zkušebního zařízení vybaveného počítačem zmíněná norma dovoluje stanovení modulu pružnosti v ohybu lineární regresní analýzou uplatněnou na část křivky napětí/deformace nacházející se mezi body $\varepsilon_{f1} = 0,0005$ a $\varepsilon_{f2} = 0,0025$:

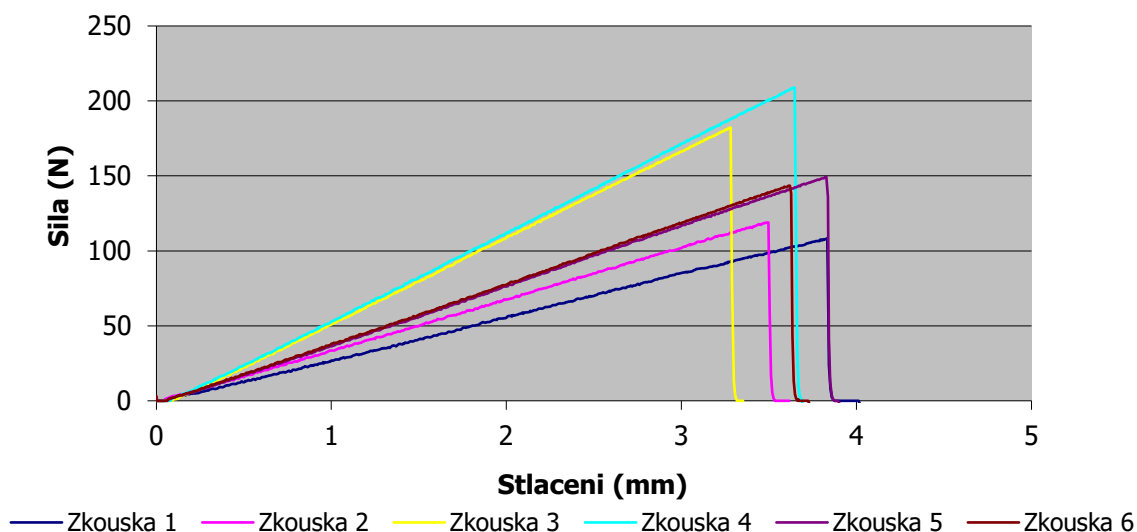
Pro poměrné deformace z intervalu (ε_{f1} ; ε_{f2}) a jim odpovídající σ_f byla nalezena lineární regrese vyjádřená rovnicí

$$y = a \cdot x + b \quad (3.10)$$

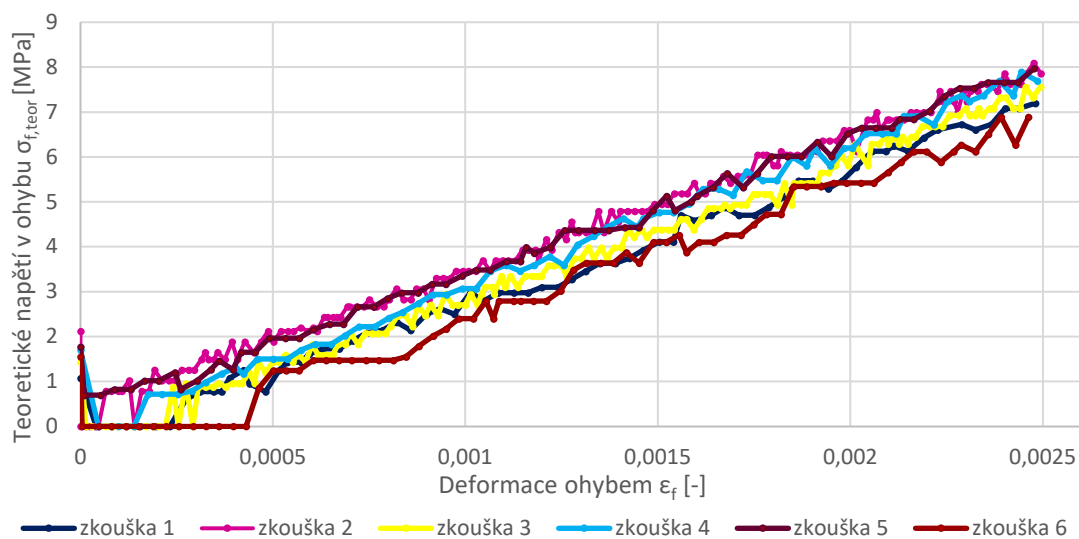
kde $b = 0$.

Níže jsou pro každý zkoušený materiál zobrazeny tři grafy. První graf je výstupem ze softwaru zkušebního stroje a zobrazuje nárůst síly od počátečního klidového stavu do rozlomení vzorku. Druhý graf vyjadřuje závislost mezi vypočteným teoretickým ohybovým napětím $\sigma_{f, \text{teor}}$ a ohybovou deformací vzorku na intervalu (0; 0,0025). Podobně jako u tahových zkoušek, i zde jsou některé křivky $\sigma_{f, \text{teor}} - \varepsilon_f$ posunuty vůči počátku souřadného systému, tentokrát ve vodorovném směru – na vzorku byl naměřen průhyb ještě před začátkem zatěžování. Úprava výpočtu je stejná jako u tahových zkoušek, součinitel b z rovnice (3.4) uvažován nenulový.

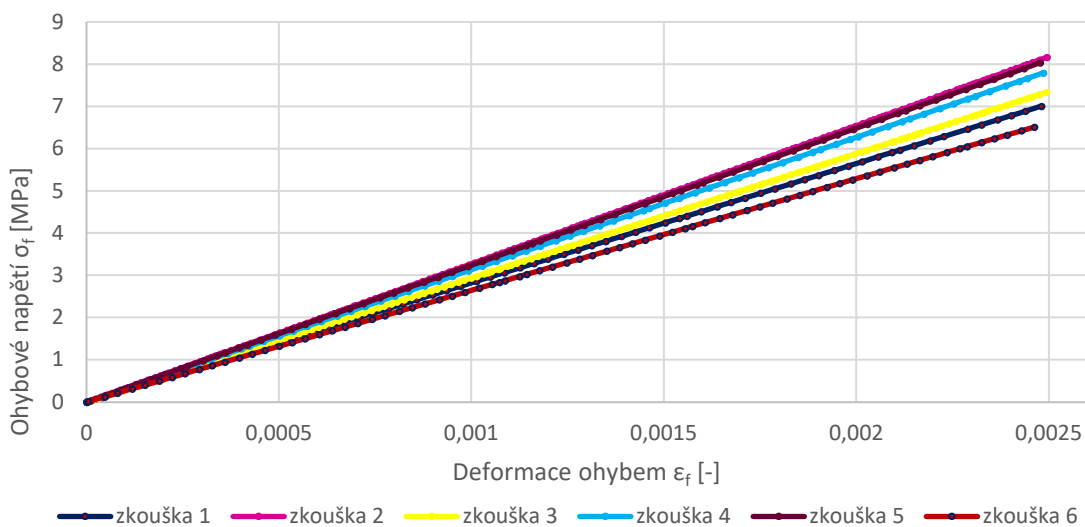
Na třetím grafu je ohybové napětí na intervalu (0; 0,0025) vykresleno jako lineárně závislé na poměrné deformaci.



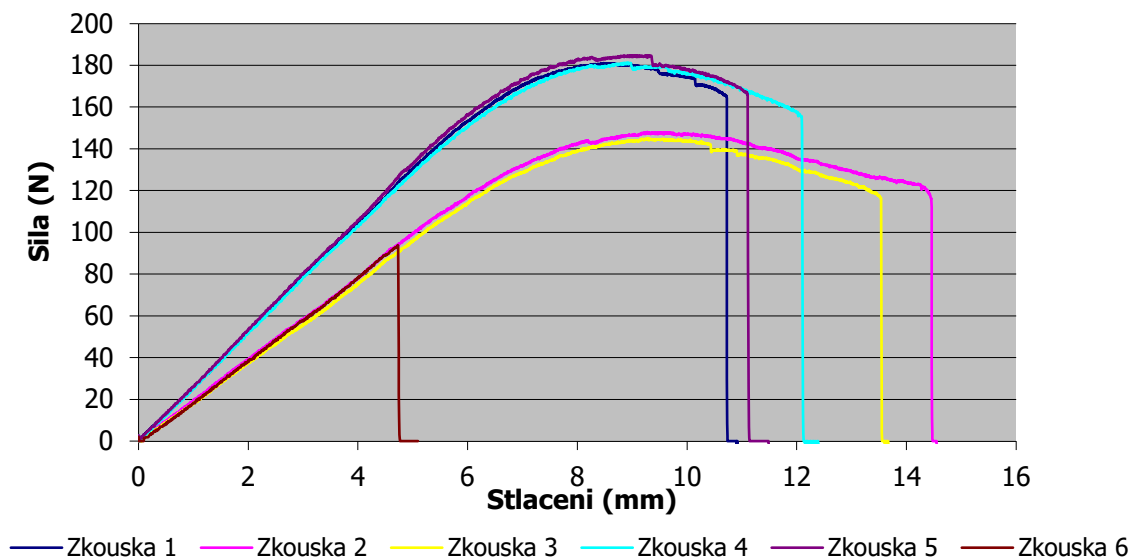
Obrázek 27 - Graf síla / průhyb pro materiál LH 385 + H512



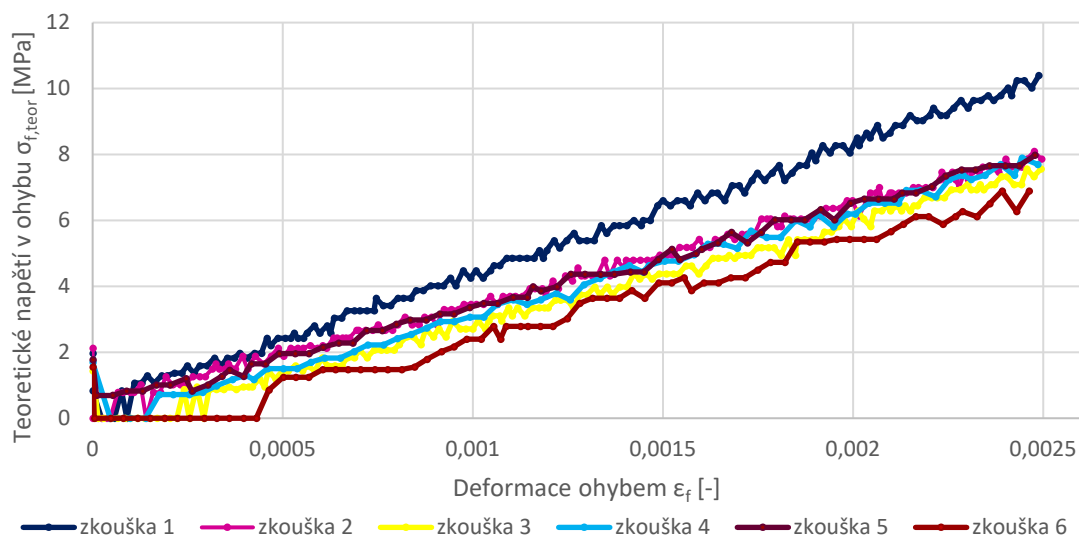
Obrázek 28 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 + H512



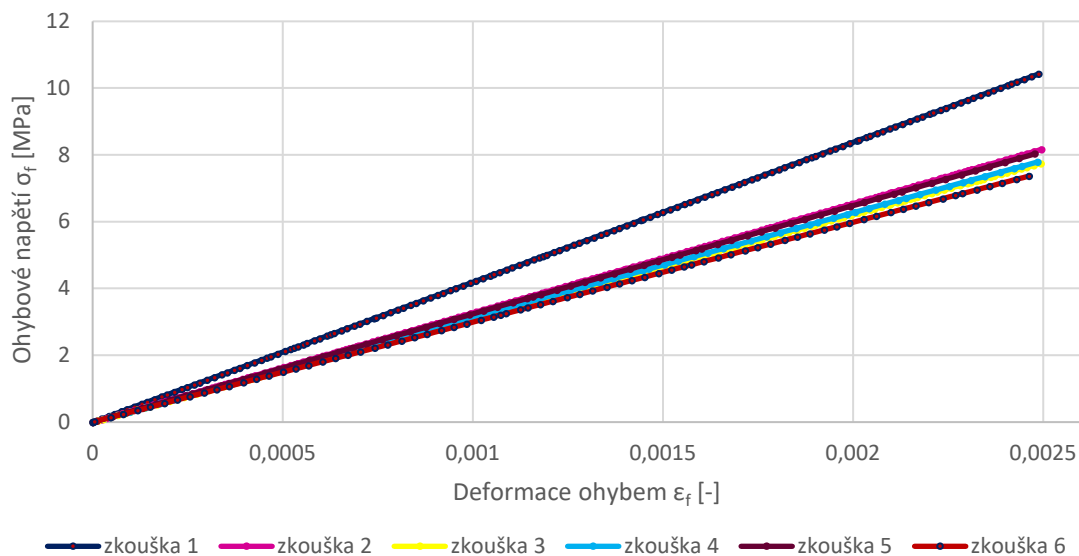
Obrázek 29 - Graf ohýbové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 / H512



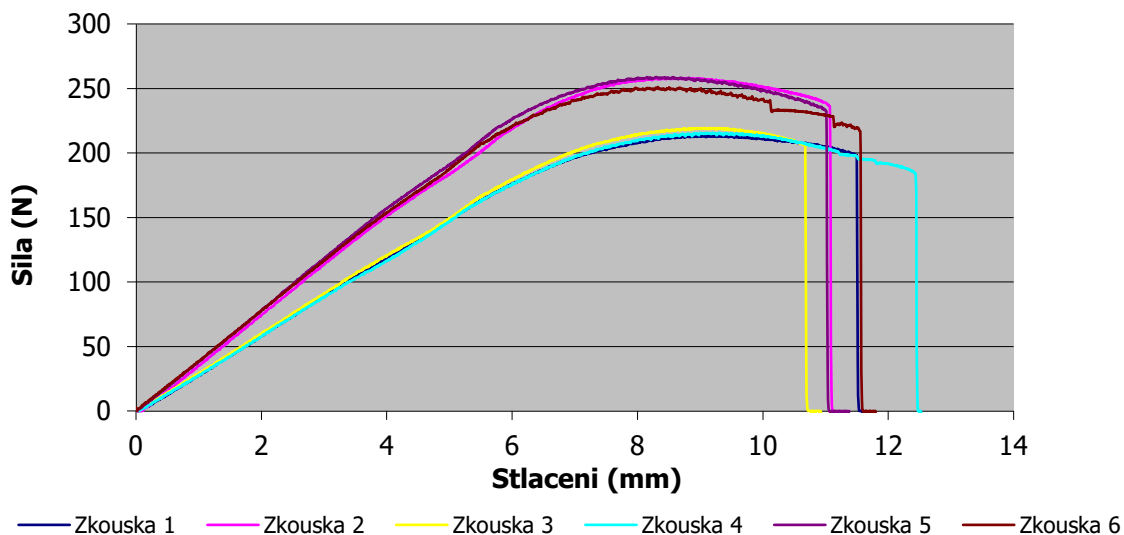
Obrázek 30- Graf síla / průhyb pro materiál LH 288 + H146



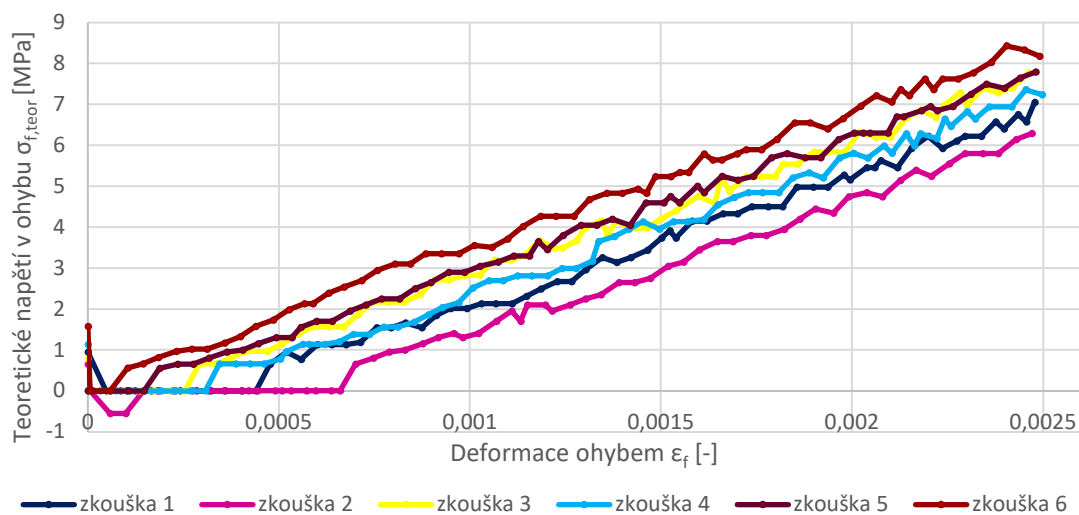
Obrázek 31 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 288 + H146



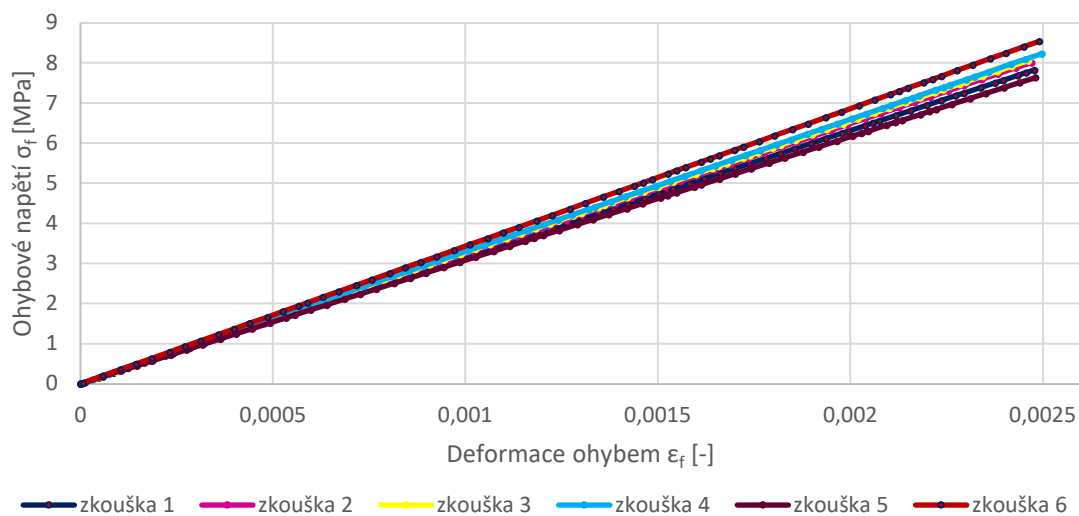
Obrázek 32 - Graf ohybové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 288 / H146



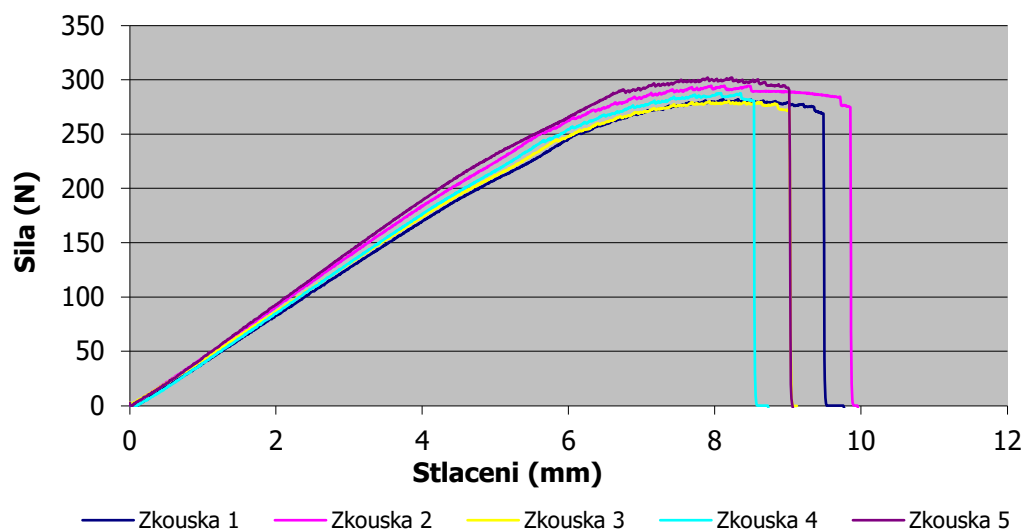
Obrázek 33 - Graf síla / průhyb pro materiál LH 289 + H146 (modrá)



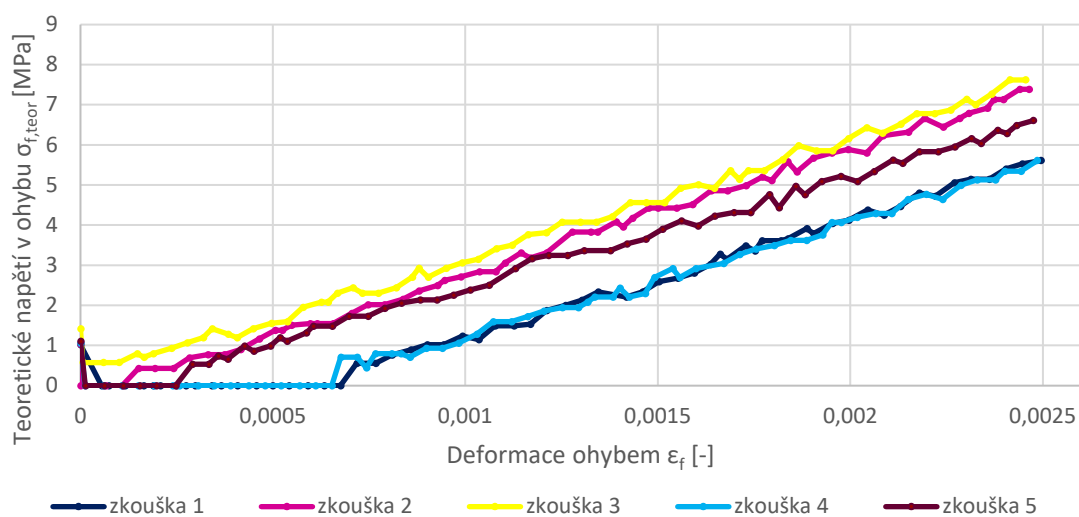
Obrázek 34 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 289 + H146 (modrá)



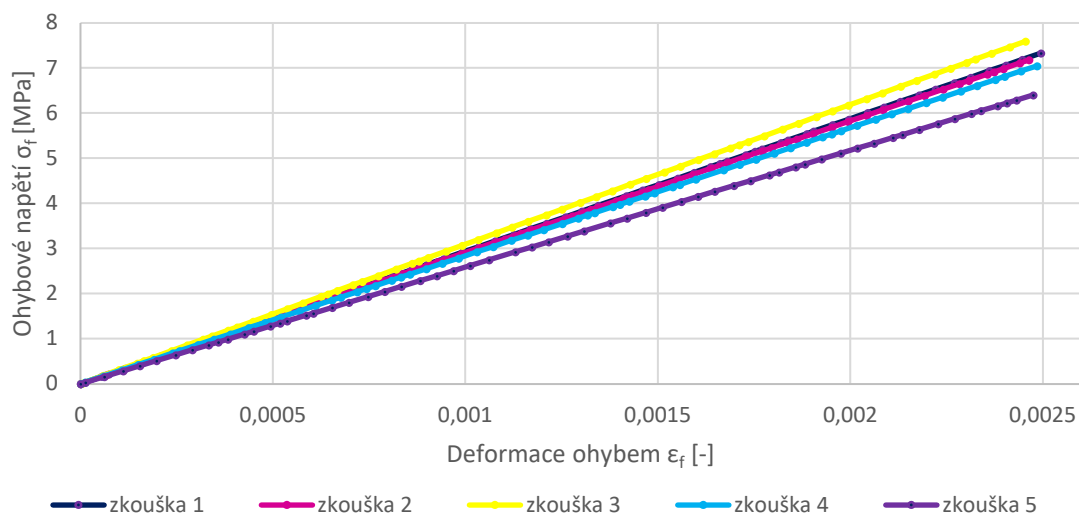
Obrázek 35 - Graf ohybové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 289 + H146 (modrá)



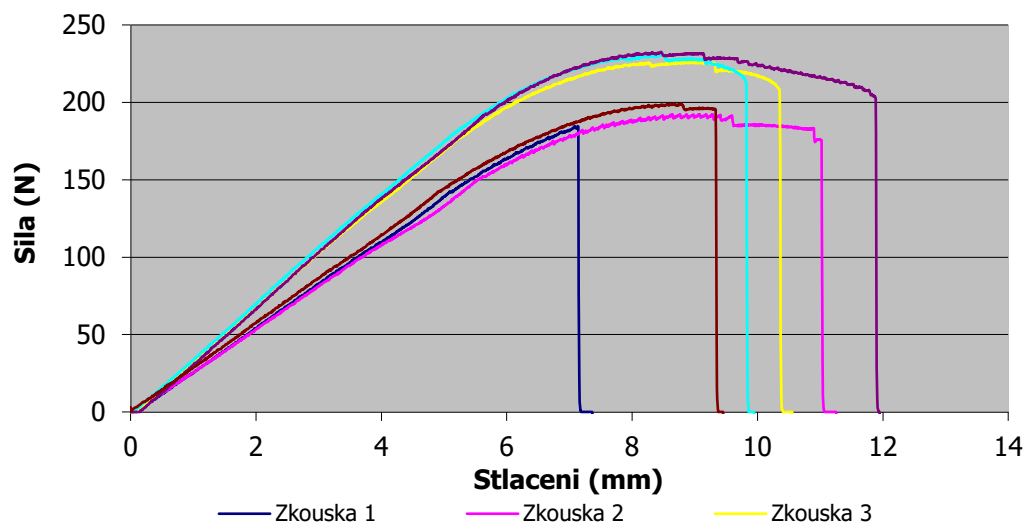
Obrázek 36 – Graf síla / průhyb pro materiál LH 289 + H146 (zelená)



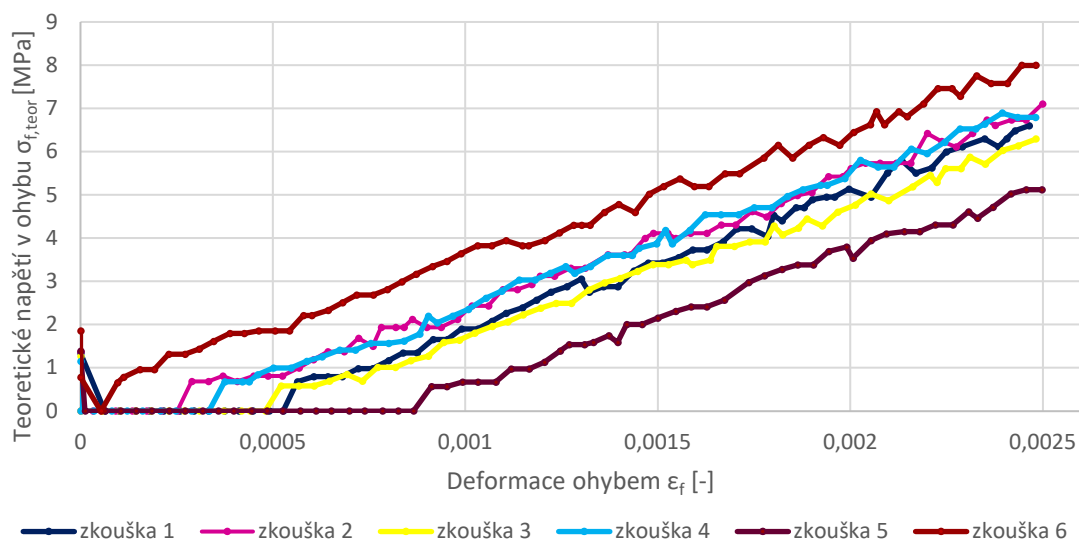
Obrázek 37 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 289 + H146 (zelená)



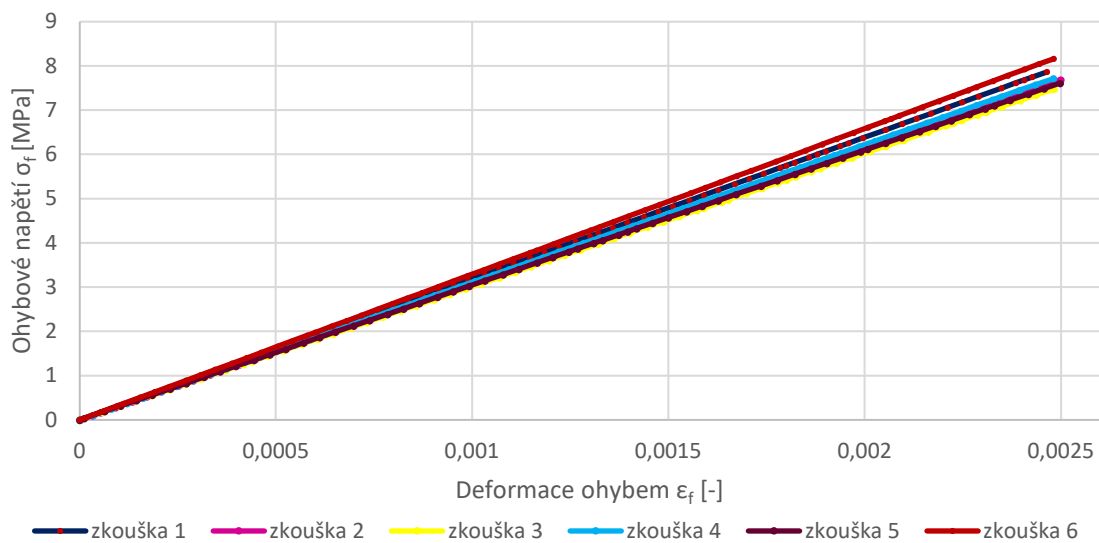
Obrázek 38 Graf ohybové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 289 + H146 (zelená)



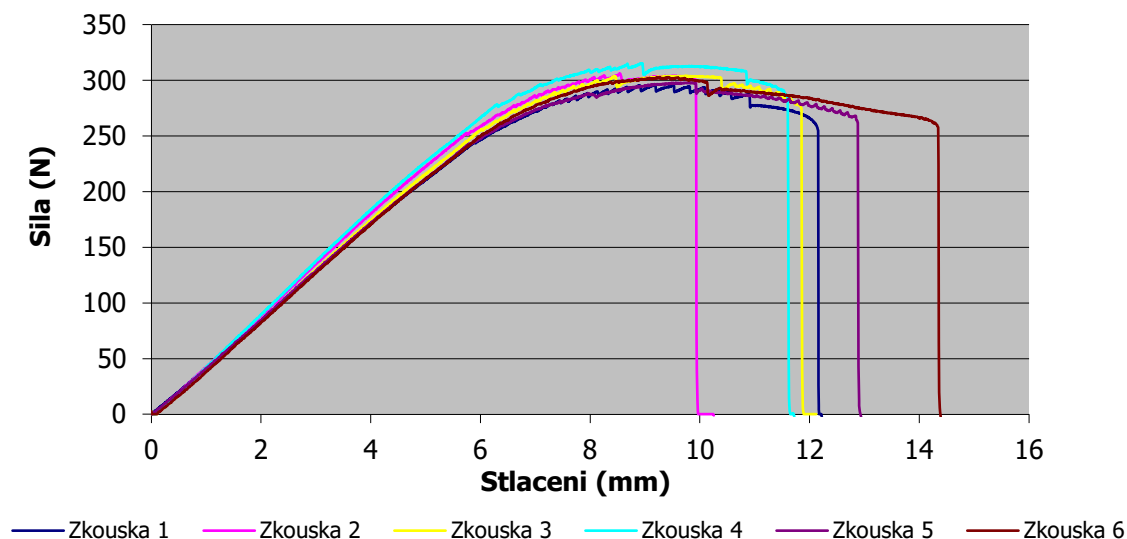
Obrázek 39 - Graf síla / průhyb pro materiál LH 385 + H146



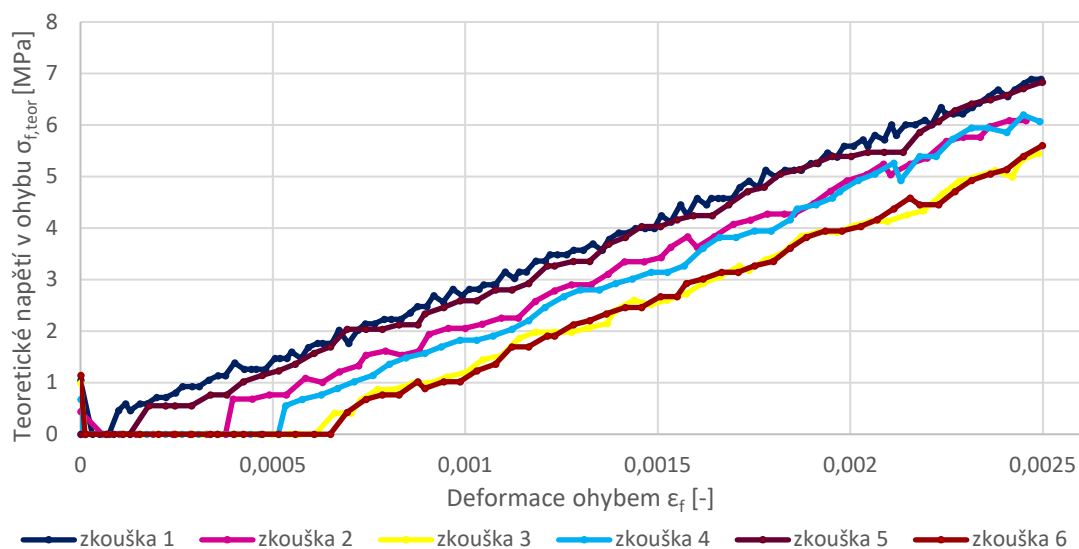
Obrázek 40 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 + H146



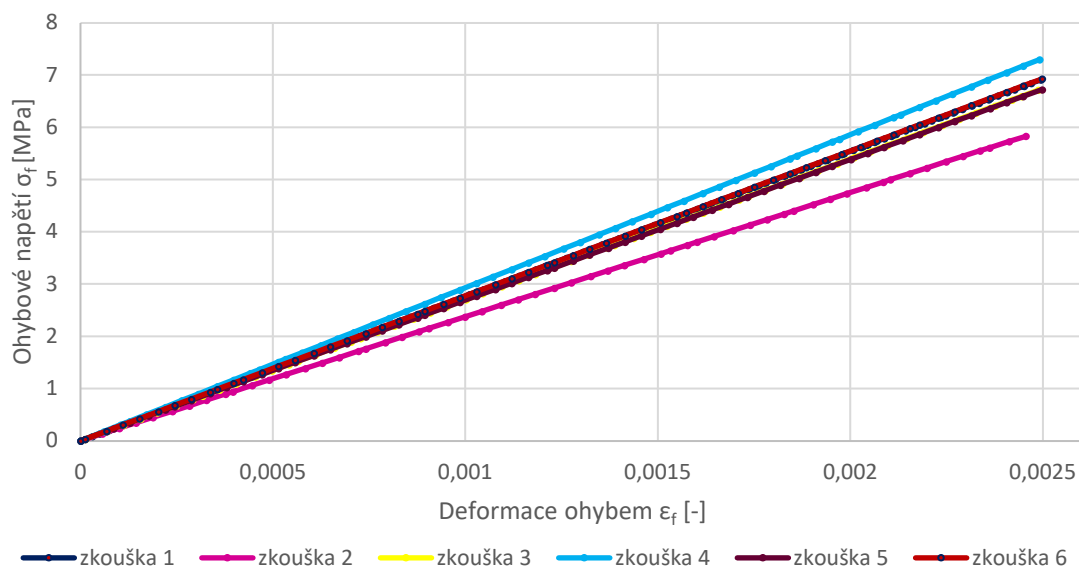
Obrázek 41 - Graf ohybové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 + H146



Obrázek 42- Graf síla / průhyb pro materiál LH 385 + H287



Obrázek 43 - Graf teoretické napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 + H287



Obrázek 44 - Graf ohybové napětí / deformace ohybem pro materiál LH 385 + H287

V tabulce 3 jsou zkoušené materiály seřazené sestupně podle vypočítaného modulu pružnosti.

Tabulka 3 - Výpočet stanovený modul pružnosti v ohybu

	Materiál	Modul pružnosti [MPa]
1.	LH 288 + H 146	3323,606
2.	LH 289 + H 146 (modrá)	3245,037
3.	LH 385 + H 146	3121,067
4.	LH 385 + H 512	3042,349
5.	LH 289 + H 146 (zelená)	2872,317
6.	LH 385 + H 287	2705,512

4 Tahové a ohybové zkoušky s měřením akustické emise

Pojmem akustická emise se označuje fyzikální jev, při kterém pozorujeme akustické signály vysílané tělesem, a zároveň diagnostickou metodu založenou na tomto jevu. Prvopočátky akustických metod můžeme vidět v prostém poklepání na povrch tělesa – podle zvuku vydávaného tělesem můžeme zjistit výskyt dutin, odlepení povrchového materiálu od podkladu, můžeme zjistit druh materiálu tělesa: plast vydává při poklepu jiný zvuk než sklo nebo kov. Tato metoda je velmi subjektivní a poskytuje pouze přibližné výsledky, proto při průzkumech používáme standardizované postupy měření a měřicí přístroje schopné přesně vyjádřit jak vstupy, tak výstupy.

Akustické metody obecně rozdělujeme podle způsobu buzení a příjmu vlnění, kdy zvukové vlnění může být buzeno koherentně nebo inkoherentně. Častěji využívané koherentní buzení pracuje s definovanými frekvencemi a fázovými rozdíly. K vybuzení akustických vln užíváme některou z elektromagneticko-mechanických interakcí (např. piezoelektrický, piezomagnetický jev, elektrostriktci apod.). Tyto interakce využíváme i k detekci [8].

Inkoherentní zvuk bývá buzen převážně stochastickými (nahodilými) dynamickými procesy, například plastickou deformací, elektrickým výbojem, tepelným šumem nebo nepružným rozptylem záření ve zkoumaném tělese.

Oba typy generace a detekce zvukové vlny se mohou realizovat bezkontaktním způsobem (obvykle v rezonátorech), nebo kontaktním způsobem prostřednictvím vhodné kapalné látky (např. silikonového oleje, gelů apod.). Dále můžeme akustické metody rozdělit na měření využívající vlny stojaté a měření využívající vlny postupné.

Metody využívající stojatých vln se nazývají rezonanční metody. Základními veličinami při měřeních se stojatými vlnami v režimu vynucených kmitů jsou rezonanční frekvence, činitel jakosti, perioda doznívajících kmitů a logaritmický dekrement útlumu. Na tomto principu pracují především akustické spektrometry.

Metody založené na postupném vlnění, případně na vlnových pulsech, zjišťují hlavně fázové a grupové rychlosti, koeficient absorpce, zpoždění signálu, frekvenční spektra a další.

Technika snímání akustické emise (AE) patří k defektoskopickým metodám zařazeným do skupiny nedestruktivních zkoušek. Jde o metodu pasivní inkoherentní, využívající postupných vlnových pulsů. Podstatou je snímání elastického vlnění, které vzniká v důsledku dynamických procesů objevujících se v materiálu při jeho zatěžování vnitřními nebo vnějšími silami. Vzniklé mechanické vlnění se snímá sítí snímačů rozmístěných na povrchu konstrukce. Snímače transformují elastické napěťové vlny v místě snímače na nízkonapěťový elektrický signál. V předzesilovači umístěném v blízkosti snímače je signál zesílen a filtrován. Filtrace vylučuje nízkofrekvenční mechanické a elektrické rušení. Signál je transformován na nízkoimpedanční a postupuje koaxiálním kabelem k měřicímu systému akustické emise, kde je opět zesílen a při překročení prahové úrovně vyhodnocován.[9]

Pro využití akustické emise jsou nutné snímače citlivé pro dané frekvenční pásmo a speciálně konstruované elektronické zařízení. Základní jednotkou každého zařízení pro detekci a měření akustické emise je měřicí kanál, který plní tyto funkce:

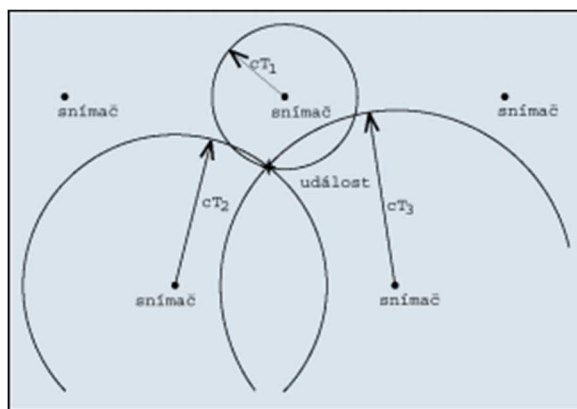
- transformuje napěťovou vlnu v místě přiložení snímače na elektrický signál,
- zesiluje elektrický signál,
- diskriminuje elektrický signál podle amplitudy a frekvence.



Obrázek 45 - Schéma měřicí trasy [9]

Základním úkolem metody AE je zjištění, klasifikace a lokalizace emisních zdrojů. Zdrojem AE se rozumí prostorový prvek, ve kterém vzniká jedna (nebo více) událost (událostí) akustické emise. Jestliže v důsledku namáhání vznikají a formují se trhliny, uvolňuje se část akumulované energie. Tento jev se nazývá primární akustická emise.

Lokalizace trhlín - zdrojů akustické emise – je poměrně jednoduchá, protože signál se v materiálu šíří přímočaře a konstantní rychlostí. Pokud se dostatečně přesně zaznamenají okamžiky zachycení signálu na více snímačích, je možné vypočítat z polohy snímačů a z časové prodlevy mezi záznamy polohu zdroje.

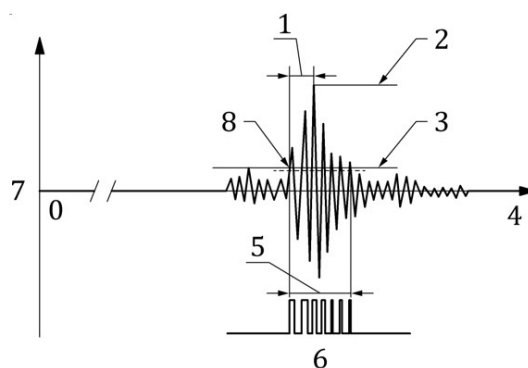


Obrázek 46 - Schematické znázornění principu lokalizace zdrojů AE [9]

Při měření na reálném zařízení jsou však systémem zachyceny emisní události ze všech emisních zdrojů, tedy i ze zdrojů sekundární emise, způsobené třením nebo únikem. Aby byly výsledky měření směrodatné, je nezbytně nutné určit původ emisního zdroje a vyloučit ty zdroje, které není nutné považovat za zdroje potenciálního nebezpečí.

Při snímání AE sledujeme počet hitů a jejich energii. Hit signálu AE je časově izolovaný signál, který překročil předem stanovený práh detekce (v anglické literatuře „threshold“) a po určité době došlo k jeho opětovnému podkročení. Hit signálu má tyto parametry:

- 1 – Doba náběhu na max. amplitudu (časový interval mezi prvním překročením prahu detekce a maximální amplitudou) [μs]
- 2 - Amplituda signálu [dB_{AE}]
- 3 – Práh detekce akustické emise (úroveň napětí, která musí být překročena, aby bylo možné detekovat signál akustické emise) [dB_{AE}]
- 4 – Čas [s]
- 5 – Doba trvání hitu (časový interval mezi prvním a posledním překročením prahu detekce nespojitým signálem) [μs]
- 6 - Počet překmitů nad prahovou úroveň (počet kmitů nespojitého signálu, který překročí práh detekce v jedné polaritě během doby trvání nespojitého signálu)
- 7 – Napětí
- 8 – První překročení prahu



Obrázek 47 - Hit nespojitého signálu AE

Příčinu vzniku emisního zdroje je možné určit z chování zdroje v průběhu zvyšování a snižování zatížení a dále podle charakteru emisních událostí pocházejících z tohoto zdroje. Hlavními znaky emisního zdroje způsobeného vznikající trhlinou jsou např. Kaiserův jev, aktivní charakter emise a vysoká intenzita emise.

Kaiserovým jevem je nazýván jev, kdy je emisní zdroj aktivní pouze při zvyšování zatížení nad mez, které již bylo dříve dosaženo. Takovýto zdroj tedy neemituje ani při snižování zatížení, ani při opětovném zvyšování na provozní hodnotu. Charakter aktivity popisuje, jak rychle roste počet událostí emitovaných zdrojem při lineárním růstu zatížení. Intenzitou zdroje se rozumí průměr amplitud jednotlivých emisních událostí zdroje.

Snímání AE je účelné zejména pro netradiční materiály, např. pro duplexní a austenitické oceli, zhouževnatělé keramiky, polymerní kompozity atd. Metoda je vhodná – kromě základního výzkumu v oblasti lomové mechaniky a mechanických, korozních a jiných vlastností materiálu – pro monitorování stavu některých náročných konstrukcí, při provozních zkouškách tlakových nádob, monitorování stavu jaderných zařízení, zjišťování úniků různých médií, dále v oblasti letecké techniky i při sledování dodržení technologických postupů (obrábění, tváření, svařování). Snímání AE umožňuje sledovat kumulaci poškození, průběh plastické deformace, iniciaci a šíření trhlin, různé fázové transformace, korozní děje, vždy ovšem musí jít o aktivní defekty. Značnou výhodou metody AE je možnost její aplikace při běžném provozu hodnoceného zařízení, čímž dochází k výrazným ekonomickým úsporám. Mnohdy se pro další klasifikaci nalezených aktivních a kriticky aktivních zdrojů AE využívají další metody nedestruktivního zkoušení, ty však sledují již jen oblasti vytipované akustickou emisí.

Nevýhodou metody snímání AE je neobjasněnost způsobu vzniku emisních balíků a tedy nemožnost jednoznačné interpretace měření, dále příliš malá energie mnohých akustických pulsů, které pak zanikají v šumovém pozadí detektoru.

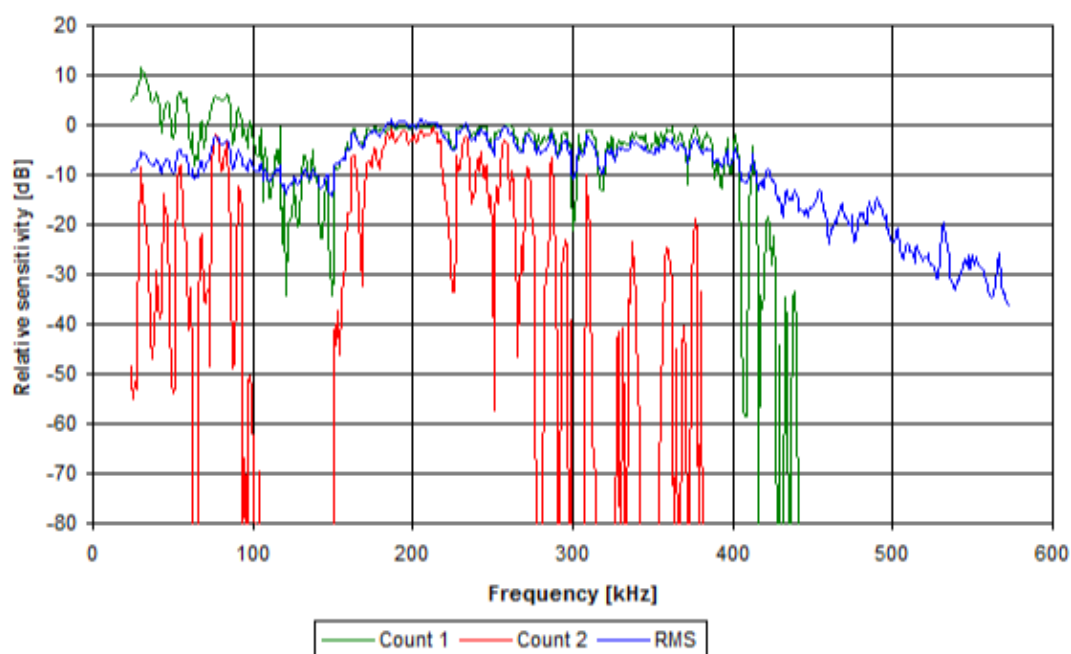
4.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa byla vyřezána CNC frézku z tabule tl. 5 mm s matricí z kombinace pryskyřice LH 289 a tužidla H146 a s výztuží ze sedmi vrstev uhlíkové tkaniny v keprové vazbě o gramáži 600 g/m². Rozměry a tvary těles pro tahové i ohybové zkoušky jsou stejné jako u předchozích zkoušek.

4.2 Měřicí přístroje

Stejně jako zkoušky nevyztužených vzorků byly i zkoušky vzorků s uhlíkovými vlákny provedeny na zkušebním stroji Testometric M500-50CT, tentokrát doplněnou o aparaturu Vallen AMSY-6 využívající celkem tři měřicí kanály. Kanály jsou součástí dvou signálových procesorů ASIP-A2 (signálový procesor = měřicí karta).

Ke snímání AE byly použity snímače DAKEL MIDI s použitelným frekvenčním pásmem od 50 do 500 kHz. Tyto snímače jsou díky svým rozměrům – průměr 6 mm a výška 6,3 mm – přímo určeny pro laboratorní měření na malých objektech, ke kterým se připevňují lepením.



Obrázek 48 - Frekvenční charakteristika snímače DAKEL MIDI

Snímaný signál byl následně zesilován s využitím předzesilovačů Vallen AEP5H, pracujících ve frekvenčním rozsahu 20 kHz až 2.4 MHz s hodnotou zesílení 34 dB (to odpovídá padesátinásobnému zesílení signálu).

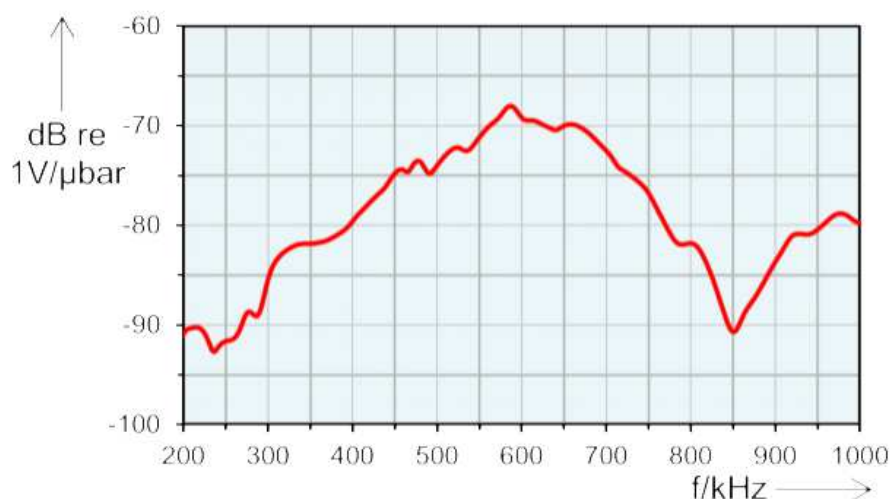
4.3 Tahová zkouška

Zkoušky byly řízeny deformačně. První z trojice tahových zkoušek byla provedena při rychlosti zatěžování 1 mm/min, což vedlo k zahlcení snímačů signály od rychle se rozvíjejícího porušení vzorku. Pro další dvě měření proto byla rychlost snížena na 0,5 mm/min, aby uvolňování energie AE v důsledku vznikajícího porušení bylo pozvolnější.

Extenzometry byl použity pouze u první zkoušky. Vzhledem k tomu, že porušování kompozitu má explozivní charakter, v jehož důsledky dochází k posouvání hrotů extenzometru a tím i ke znehodnocení měření, bylo u dalších dvou zkoušek od měření extenzometry upuštěno.

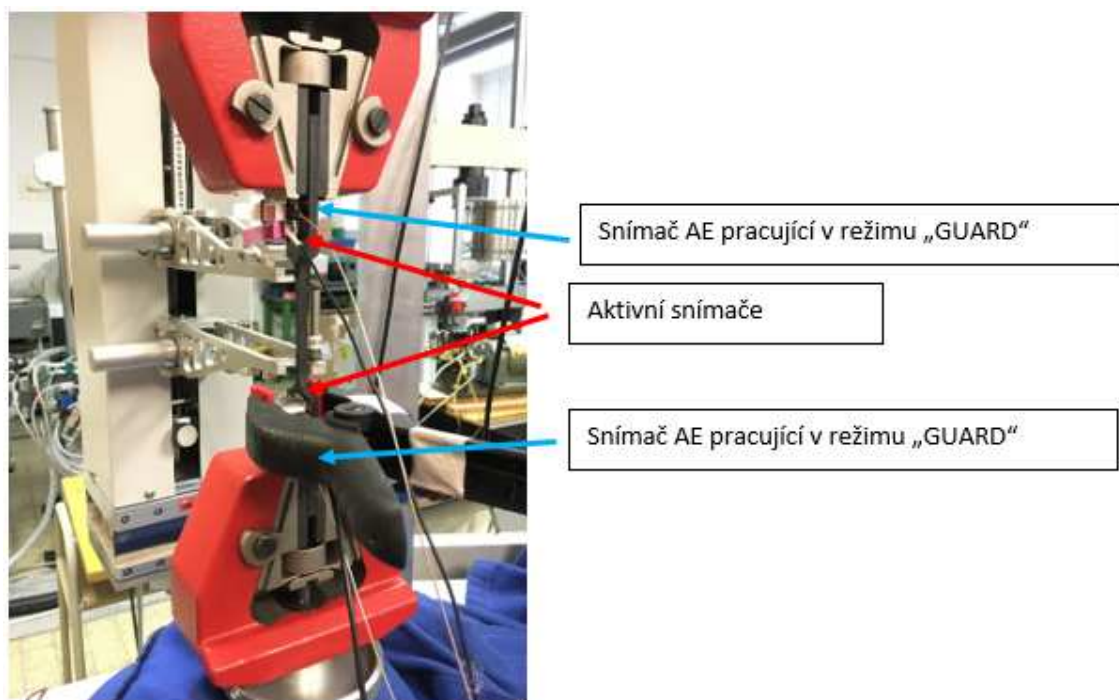
Práh snímání (threshold) byl při tahové zkoušce nastaven na 40 dB_{AE}, a ze signálů AE byly akceptovány pouze ty, které měly energii vyšší než 30 aJ. Vzorkovací frekvence dat akustické emise byla rovna 10 MHz, přičemž stejná hodnota vzorkovací frekvence připadala na vzorkování vlnových průběhů.

Pro odlišení signálů užitečných, které vznikají ve funkční oblasti vzorku, od signálů vznikajících vlivem tření a případného porušení v čelistech, byly na vzorek aplikovány tzv. GUARD snímače (Vallen VS 600 Z1).



Obrázek 49 - Frekvenční charakteristika snímače VS600-Z1

Jde o klasické snímače AE, kterým je v softwaru pro zpracování AE přiřazena funkce filtru - pokud signál AE dorazí ke GUARD snímači dříve než k snímači, jenž je umístěn na funkční části vzorku, aparatura AE tento signál dále nezpracovává.

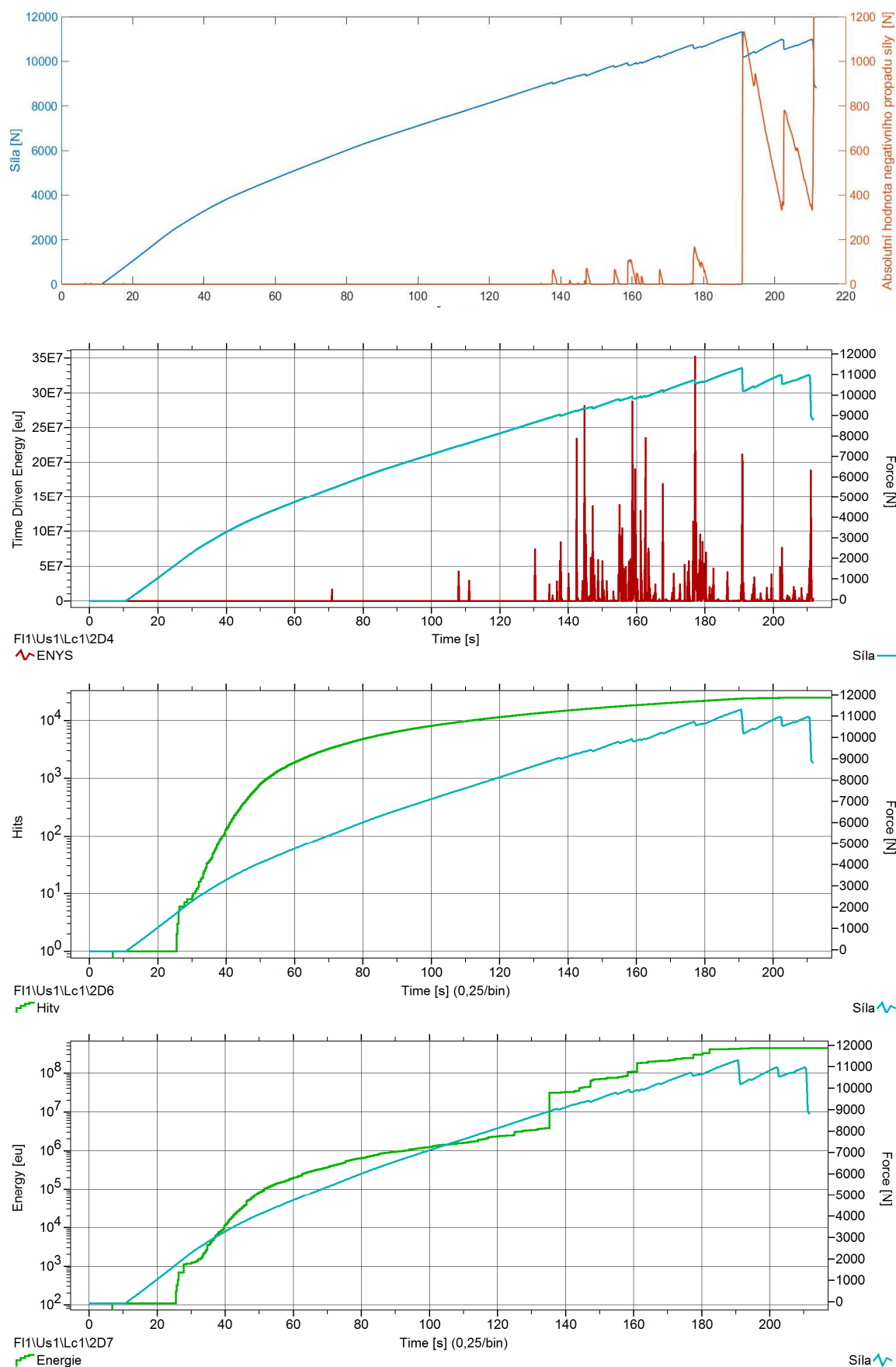


Obrázek 50 - Umístění aktivních a kontrolních (guard) snímačů na vzorku pro tahovou zkoušku

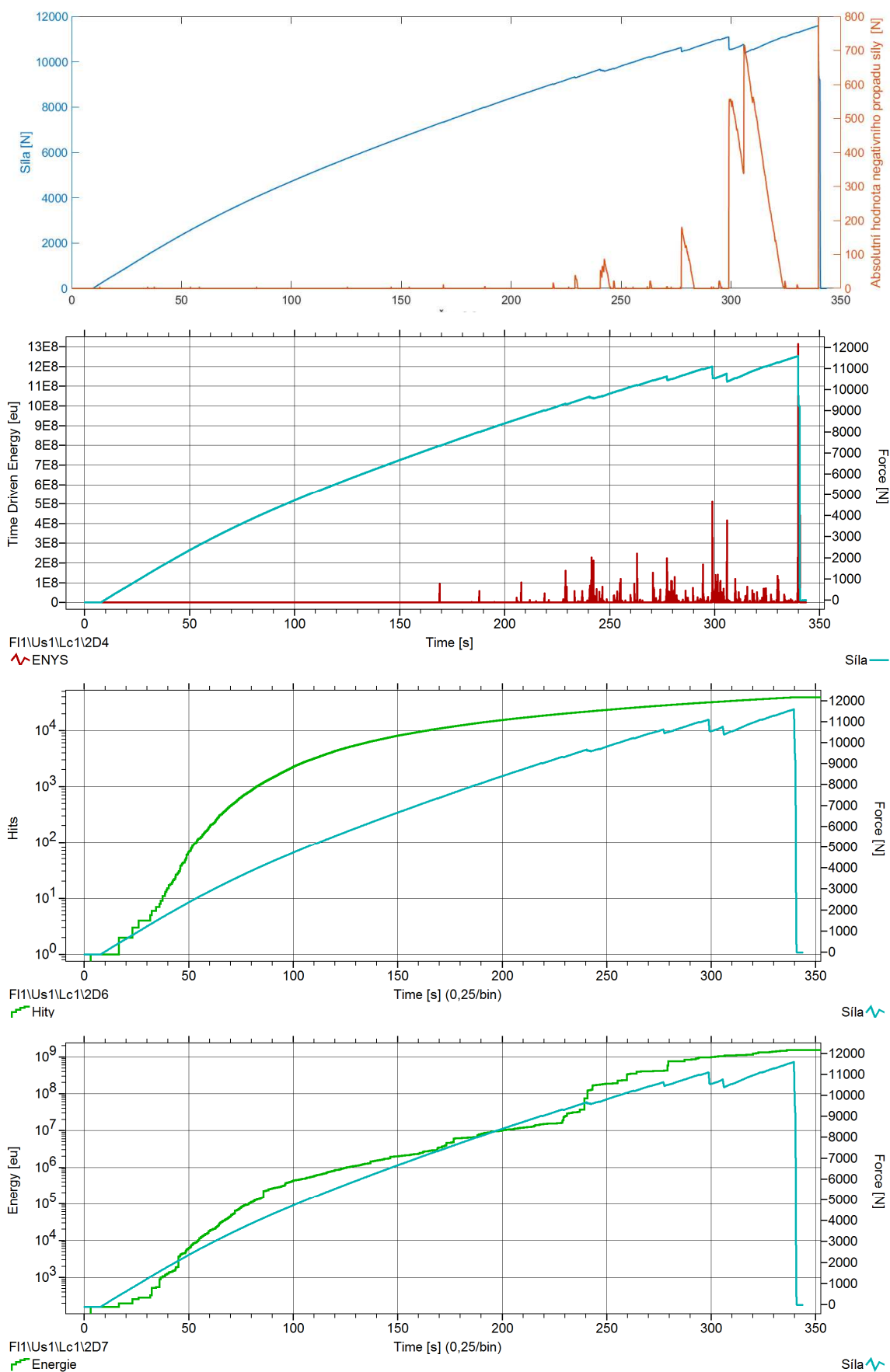
V případě tahových zkoušek byl sledován vývoj akumulovaného počtu hitů v čase včetně akumulované energie AE těchto hitů. Vznikající poškození lze detekovat s využitím záznamu síly, u něhož vlivem rozsáhlejších poruch dochází k jejímu poklesu (což je důsledek toho, že při delaminaci a praskání výztužných vláken a při praskání matrice vzorek tak říká „odlehčuje“ tah na čelistech). Pro automatickou detekci tohoto jevu byl v prostředí software MATLAB vytvořen skript, jenž počítá absolutní hodnotu propadu síly. Uvedenou veličinu je možné korelovat jednak s průběhem

kumulativní energie AE respektive kumulativním počtem hitů AE, přičemž v okamžiku detekce negativního propadu síly si v určitých případech můžeme všimnou skokového nárůstu akumulované energie AE/počtu hitů AE. Pro zvýraznění této závislosti je pro každý vzorek navíc vykreslena veličina ENYS definovaná přístrojem Vallen jako poměr energií AE pro dva poslední časové intervaly, které měly v našem případě velikost 100 milisekund. Do tohoto poměru je kromě energie hitů zahrnuta i energie šumu. Uvedená veličina prakticky naprosto přesně kopíruje výskyt negativních propadů síly v průběhu zkoušky.

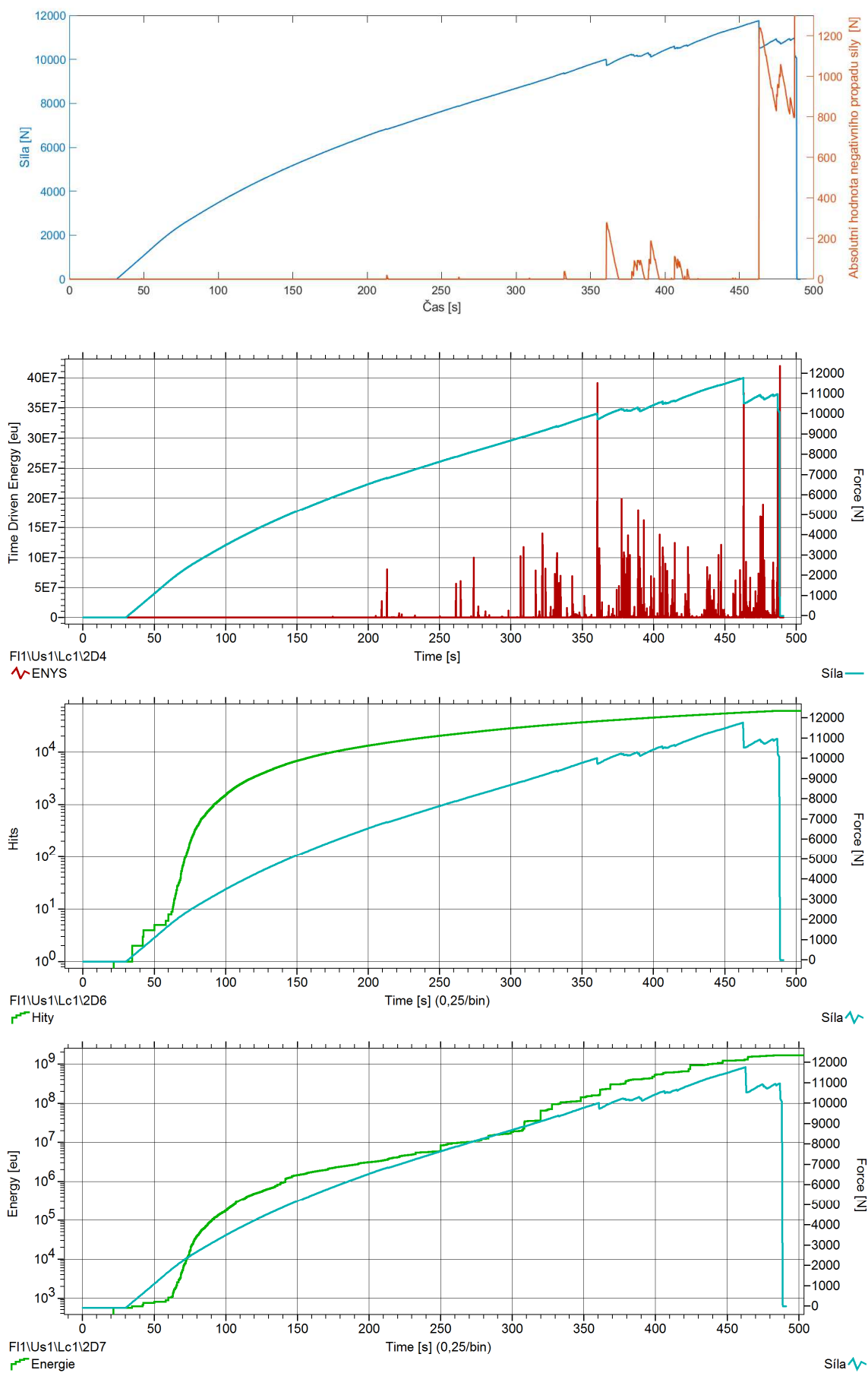
Z grafů lze také vyčíst, že v lineární (elastické) oblasti je zaznamenáno minimum hitů AE, po překročení meze elasticity začne počet hitů AE narůstat exponenciálně.



Obrázek 51 – Tahová zkouška č. 2. Shora: Propad síly po rozvoji poruchy, poměr celkové energie AE mezi časovými intervaly (tzv. ENYS), zaznamenaný počet hitů a akumulovaná energie hitů.



Obrázek 52 - Tahová zkouška č. 3: Shora: Propad síly po rozvoji poruchy, poměr celkové energie AE mezi časovými intervaly (tzv. ENYS), zaznamenaný počet hitů a akumulovaná energie hitů.

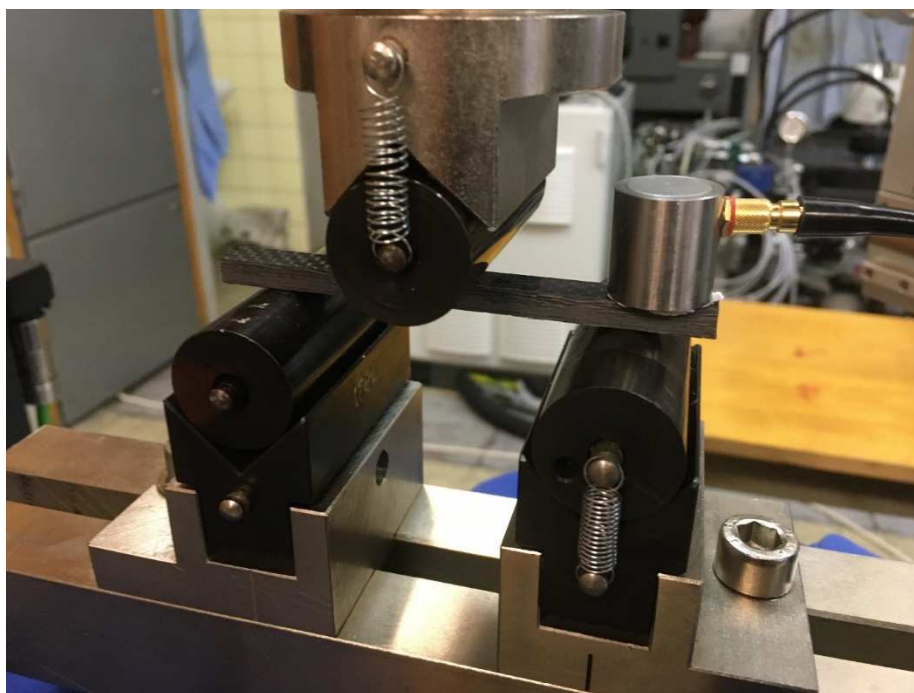


Obrázek 53 – Tahová zkouška č. 4. Shora: Propad síly po rozvoji poruchy, poměr celkové energie AE mezi časovými intervaly (tzv. ENYS), zaznamenaný počet hitů a akumulovaná energie hitů.

4.4 Ohybová zkouška

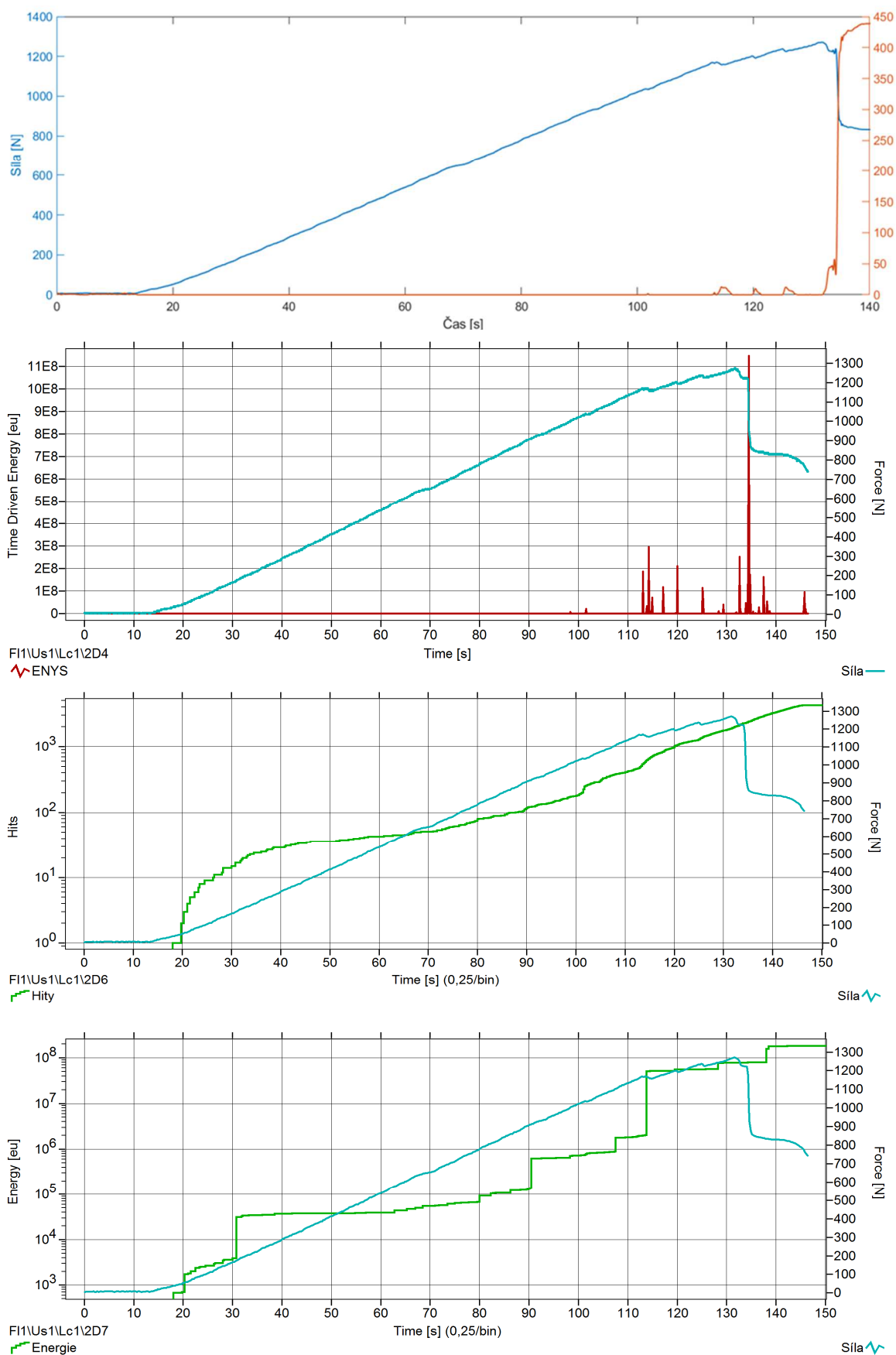
Ohybové zkoušky byly provedeny na zkušebních tělesech tvaru kvádříku o rozměrech 100 x 10 x 5 mm. Rozteč podpěr byla zvolena 90 mm. Zkoušky byly opět řízeny deformačně, rychlost byla zvolena 1 mm/min.

Zkušební a měřicí přístroje byly totožné jako u tahových zkoušek, pouze u první ohybové zkoušky byl použit snímač DWSC B454, který se však ukázal jako ne příliš vhodný vzhledem ke svým rozměrům. Proto data z první zkoušky nebudou prezentována. Ve zbývajících dvou zkouškách byly opět použity snímače DAKEL MIDI.

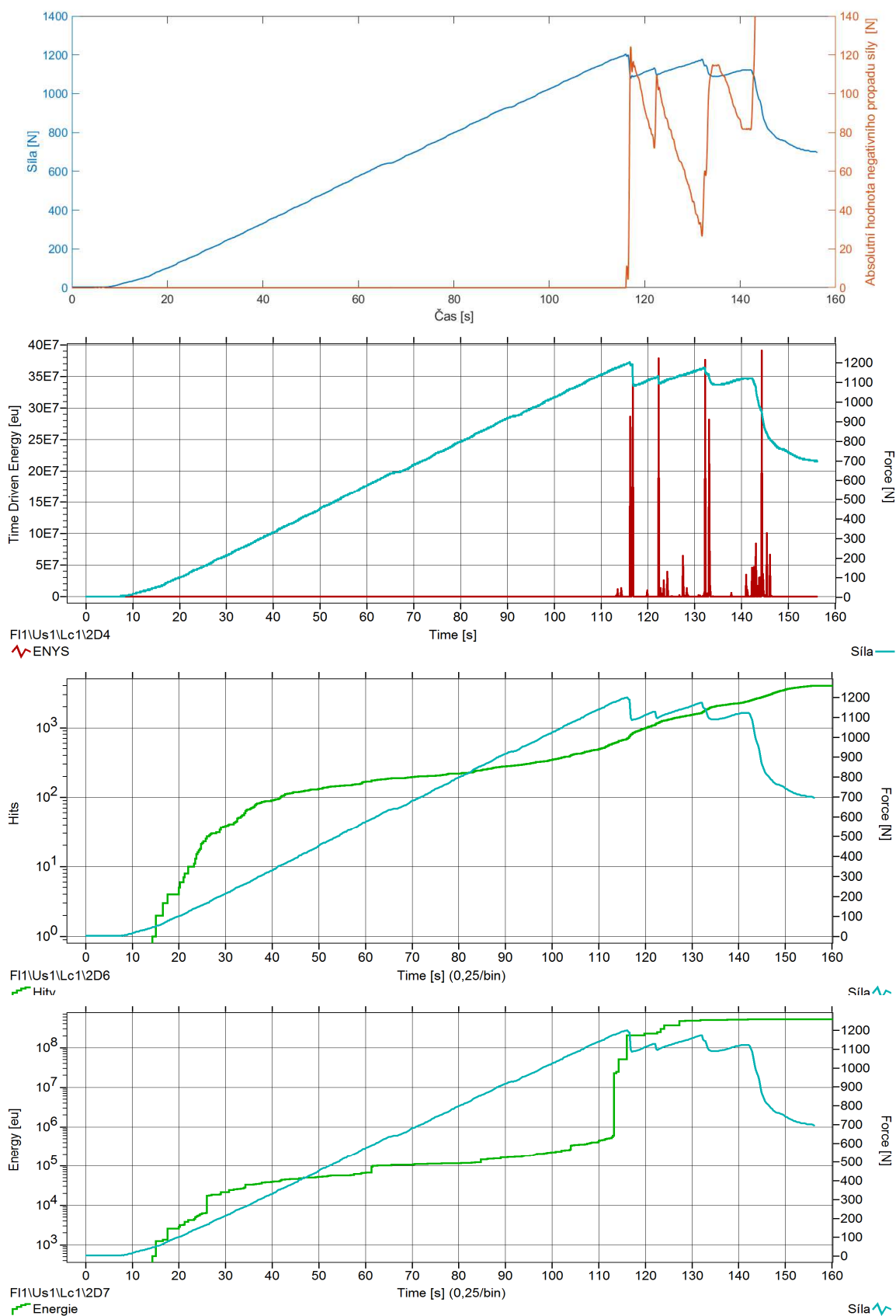


Obrázek 54 - Umístění snímače při zkoušce trojbodovým ohybem

Práh snímání signálů byl nastaven na hodnotu 40 dB_{AE}, ze signálů byly akceptovány pouze ty s energií vyšší než 30 aJ. Jak je z grafů níže zjevné, je korelace mezi propadem síly a AE daty prakticky stejná jako u tahových zkoušek.



Obrázek 55 - Ohybová zkouška č. 2. Shora: Propad síly po rozvoji poruchy, poměr celkové energie AE mezi časovými intervaly (tzv. ENYS), zaznamenaný počet hitů a akumulovaná energie hitů.



Obrázek 56 - Ohybová zkouška č. 3. Shora: Propad síly po rozvoji poruchy, poměr celkové energie AE mezi časovými intervaly (tzv. ENYS), zaznamenaný počet hitů a akumulovaná energie hitů.

5 Závěr

Předmětem této bakalářské práce bylo posouzení možnosti využití metody snímání akustické emise při porovnávání mechanických materiálů kompozitních materiálů, konkrétně kompozitů s matricí z epoxidových pryskyřic a výztuží z uhlíkových vláken.

Nejprve byly – bez měření AE - provedeny tahové a ohybové zkoušky nevyztužených pryskyřic. Zde se sluší přiznat, že už volba materiálů, ze kterých byly vzorky vyrobeny, byla chybná – některé materiály vyrobeny pouze z pryskyřice a tužidla, do jiných byla přidána barviva i jiná aditiva. Tyto látky mají také vliv na výsledné mechanické vlastnosti matrice. Porovnání modulů pružnosti v tahu a za ohybu, jehož stanovení bylo jedním z cílů těchto zkoušek, může být proto snadno zpochybnitelné. Tato chyba je jednak poučením pro další zkoušky, jednak námětem pro další práce, např. změny mechanických vlastností pryskyřic po přidání barviv a jiných přídatných látek, podíl matrice na výsledných mechanických vlastnostech epoxidových kompozitů atp.

V první fázi tedy byly provedeny tahové a ohybové zkoušky nevyztužených pryskyřic s cílem určit jejich mechanické vlastnosti. Z dat získaných těmito zkouškami – silového zatížení vzorku a deformací těmito silami vyvolanými – byly za pomoci regresní analýzy vypočteny moduly pružnosti v tahu a za ohybu.

Ve druhé fázi byly uskutečněny zkoušky se snímáním AE. Vzhledem k tomu, že návrh zkušebních zařízení a jejich rozmístění, návrh parametrů zkoušky a sledovaných veličin a jejich následné vyhodnocení je silně závislé na znalostech a zkušenostech osoby provádějící měření, byla vždy první zkouška z každé série brána jako pokusná a sloužila pro zhodnocení vlivu vstupních parametrů na průběh a výsledek zkoušky. Data získaná pokusnými zkouškami nebyla dále zpracovávána. Po návrhu vylepšení zkušebního postupu pak byly provedeny zbývající zkoušky, ze kterých vzešly výsledky popsané v předchozí kapitole.

6 Citace

- [1] Kompozitní materiály. *Ústav materiálového inženýrství, Fakulta strojní* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/6_kompozitni-materialy.pdf
- [2] *Havel Composites CZ s.r.o.: Katalog výrobků*. Přáslavice, 2018.
- [3] MAŠEK, Zdeněk, Bedřich ŠTEKNER a Karel CIHELNÍK. Uhlíkové vlákno jako produkt recyklace. *Technický týdeník* [online]. 2006, 1. leden 2006, (1), 1 [cit. 2020-05-17].
- [4] Uhlíková vlákna. *Top-Armyshop* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.top-armyshop.cz/slovník-pojmu/uhlikova-vlakna>
- [5] Uhlíkové vlákno. *Kordcarbon* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://www.kordcarbon.cz/uhlikove_vlakno
- [6] ČSN EN ISO 527-1 Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy. Listopad 2012. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2012.
- [7] ČSN EN ISO 178 Plasty - Stanovení ohybových vlastností. Listopad 2019. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2019.
- [8] Akustická emise. Masarykova univerzita Pedagogická fakulta [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.ped.muni.cz/wphy/projekty/kemis.html>
- [9] Automa: Časopis pro automatizační techniku. Praha: Automa - časopis pro automatizační techniku, 2001, 7(12/2001). ISSN 1210-9592.

7 Bibliografie

- [10] GRÉGR, Jan. *Povrchové vlastnosti uhlíkových vláken: Zpráva pro Výzkumné centrum „Textil“ LN00B090*. Liberec, 2004.
- [11] Diagnostika metodou akustické emise. <https://www.mmspektrum.com>: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů [online]. Praha: MM publishing, 2002, (6/2002) [cit. 2020-05-17]. ISSN 1212-2572.
- [12] *Metoda akustické emise*. <http://michalsofer.cz/> [online]. Ostrava, 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://michalsofer.cz/files/EMvM/p11.pdf>
- [13] ČSN EN 1330-9 - Nedestruktivní zkoušení - Terminologie - Část 9: Termíny používané při zkoušení akustickou emisí. Únor 2018. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [14] PŘIBÁŇ, Miroslav a Petr HORA. Hodnocení a klasifikace závažnosti zdrojů akustické emise z hlediska zajištění bezpečnosti provozu tlakových nádob a potrubí v chemickém průmyslu. In: *Laboratoř diagnostiky materiálu* [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://www.cdm.cas.cz/publications/hora/ph_chisa2001.pdf